



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİLİNDİRİK BORUDA KARLANMANIN ISI TRANSFERİNE
ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ali Sergen ERYENİLMEZ

Çorum - 2022

**SİLİNDİRİK BORUDA KARLANMANIN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Ali Sergen ERYENİLMEZ

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ

Çorum 2022

Ali Sergen ERYENİLMEZ tarafından hazırlanan "Silindirik Boruda Karlanmanın Isı Transferine Etkisinin Deneysel İncelenmesi" adlı tez çalışması 26/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN (Jüri Başkanı)

Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ (Danışman)

Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY (Üye)



Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun ... /... /..... tarih ve sayılı kararı ile Ali Sergen ERYENİLMEZ'in Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Muhammed Asif YOLDAŞ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Ali Serken ERYENİLMEZ

SİLİNDİRİK BORUDA KARLANMANIN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ali Sergen ERYENİLMEZ

ORCID:0000-0001-7212-9290

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans

Haziran 2022

ÖZET

Karlanma mühendislik uygulamalarının birçoğunda karşılaşılan ve çoğunlukla ısı transferini olumsuz etkileyen bir durumdur. Bu tür uygulamalarda karlanmanın kontrol edilmesi hem sistem performansını hem de sistemin çalışma ömrünü büyük oranda etkilemektedir. Bu tez çalışmasında, silindir bir boru etrafında meydana gelen karlanma ve donmanın ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İç çapı 10 mm ve dış çapı 14 mm olan boru alüminyumdan imal edilmiştir. Silindirik boru 150 mm genişliğe, 140 mm yüksekliğe ve 2500 mm uzunluğa sahip şeffaf pleksi malzemeden imal edilen hava akış kanalına yerleştirilmiştir. Deneyler Reynolds sayısının 300, 506, 875, 1124 ve 1426, hava bağıl neminin %30, %45, %55 ve hava giriş sıcaklığının 15°C, 30°C ve 45°C değerleri için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde silindir boru hattında antifriz soğutma sıvısı akışkanı kullanılmıştır. Silindir boru girişi 0,126 kg/s debide ve -30°C sıcaklık da sabit tutulmuştur. Silindirik boru üzerindeki karlanma kalınlığı arttıkça ısıl taşınım katsayısı zamana bağlı olarak azalmıştır. Burada karlanmanın etkisiyle yüzeyde oluşan tabakaya bağlı olarak ısıl direnç artmış, sistemden çekilen ısı miktarı azalmıştır. Deneysel verilerden ısı transferi ve karlanma kalınlığı üzerinde en etkin parametrenin Reynolds sayısı olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısını hava giriş sıcaklığı ve bağıl nem izlemektedir.

Anahtar Kavramlar: Donma, Karlanma, Yoğuşma

Bilim Kodu: 91412, 91408

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FROST FORMATION ON HEAT TRANSFER IN CYLINDRICAL PIPE

Ali Sergen ERYENİLMEZ

ORCID: 0000-0001-7212-9290

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science

June 2022

ABSTRACT

Frosting is a condition encountered in many engineering applications and often negatively affects heat transfer. Controlling frost in such applications greatly affects both the system performance and the operating life of the system. In this thesis, the effects of frost and freezing around a cylindrical pipe on heat transfer were experimentally investigated. The tube with an inner diameter of 10 mm and an outer diameter of 14 mm is made of aluminum. The cylindrical pipe is placed in the air flow channel made of transparent plexiglass material with a width of 150 mm, a height of 140 mm and a length of 2500 mm. Experiments were carried out for 300, 506, 875, 1124 and 1426 Reynolds numbers, 30%, 45%, 55% of air relative humidity and 15°C, 30°C and 45°C values of air inlet temperature. In the experiments, antifreeze coolant fluid was used in the cylinder pipeline. The cylinder pipe inlet was kept constant at a flow rate of 0.126 kg/s and a temperature of -30°C. As the frost thickness on the cylindrical pipe increased, the thermal convection coefficient decreased with time. Here, depending on the layer formed on the surface with the effect of snow, the thermal resistance increased, and the heat transfer decreased. From the experimental data, it was determined that the most effective parameter on heat transfer and snow thickness was the Reynolds number. The Reynolds number is followed by air inlet temperature and relative humidity.

Key Terms: Freezing, Snow, Condensation

Science Code: 91412, 91408

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında bilgi ve tecrübeleri ile bana her konuda yol gösteren tez danışman hocam Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ 'a teőekkürlerimi ve saygılarımı sunarım, laboratuvar ve deneysel verilerin toplanıp yorumlanması dahil çalışmanın her alanında yardımlarını esirgemeyen Selçuk KIZILCAOĞLU ve Mehmet ŐENER 'e teőekkürlerimi sunarım.

Ali Sergen ERYENİLMEZ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLERİ

1.1. Literatür Araştırması.....	2
1.2. Kuramsal Temeller	9
1.2.1. Silindir üzerinde akış ve ayrılma	9
1.2.2. Deneysel bulguların hesaplanması	12
1.2.3. Hata analizi.....	15

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. Deney Sisteminin Tasarlanması ve İmalatı	17
2.1.1. Test Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar	18
2.1.1.1 Veri Toplayıcı.....	18
2.1.1.2 Sirkülasyonlu Su Banyosu	19
2.1.1.3 Kamera	20

2.1.1.4 Isıl Çiftler	20
2.1.1.5 Radyal Fan	20
2.1.1.6 Frekans Konvertörü.....	21
2.1.1.7 Anemometre	22
2.1.1.8 İklimlendirme Ünitesi	22
2.1.1.9 Nem Alma Ünitesi	23
2.1.1.10 Güç Kaynağı	23
2.1.1.11 Nem Verme Ünitesi.....	24
2.1.1.12 Nem Ölçer	24
2.2. Silindir Boru Geometrisinin Tasarlanması ve İmalatı.....	25
2.3. Deneysel Yöntem	26

3. BÖLÜM

BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Deneysel Verilerin Doğrulanması.....	28
3.1.1. Bağımsız Parametrelerin Isı Transferine Etkisi.....	29
3.2. Bağımsız Parametrelerin Isı Transferine Etkisi	42

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Sonuçlar ve Tartışma	53
KAYNAKLAR	54
EKLER	57
EK-1	58
EK-2	123
EK-3	147

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Denklem (7) sabitleri	12
Tablo 1.2. Toplam hata miktarları.....	16
Tablo 2.1. Deneysel çalışma parametreleri	25



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1(a). Bir S ayrılma noktası ve ayrılma bölgesi akım çizgileri ve hız profili. Burada I sınır tabakanın bükülme noktasıdır.....	9
Şekil 1.1(b). Sınır tabaka hız profili.....	9
Şekil 1.2. Silindir üzerinde akış ve ayrılma bölgeleri	11
Şekil 1.3. Silindir yüzeyindeki karlanmanın şematik gösterimi.....	12
Şekil 1.4. Boru kesit görünüşü	14
Şekil 2.1. Deney sisteminin şematik gösterimi	17
Şekil 2.2. Test bölümü ve karlanma kalınlığı ölçümü.....	18
Şekil 2.3. Deneyin üzerinde gerçekleştirildiği boru	26
Şekil 2.4. Boru üzerinden alınan sıcaklık ölçümleri.....	27
Şekil 3.1. Boru deneysel doğrulama	28
Şekil 3.2. $T_{hg} = 30$ °C ve $R_h = \%30$ için farklı Reynolds sayılarında ısı transferinin zamana bağlı değişimi.....	29
Şekil 3.3. $T_{hg} = 30$ °C için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi.....	30
Şekil 3.4. $T_{hg} = 30$ °C ve $R_h = \%45$ için farklı Reynolds sayılarında ısı transferinin zamana bağlı değişimi.....	30
Şekil 3.5. Farklı Reynolds sayıları için ısı transferinin zamana bağlı değişimi.....	31
Şekil 3.6. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi	32
Şekil 3.7. Farklı Reynolds sayıları için ısı transferinin zamana bağlı değişimi.....	32
Şekil 3.8. $T_{hg} = 30$ °C için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi.....	33
Şekil 3.19. $T_{hg} = 15$ °C ve $R_h = \%30$ için bağımsız parametrelerin yerel ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi.....	34
Şekil 3.10. $T_{hg} = 15$ °C, $Re_d = 1426$ ve $R_h = \%60$ Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi	35
Şekil 3.11. $T_{hg} = 30$ °C ve $R_h = \%60$ ' da farklı Reynolds sayılarında $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi.....	37
Şekil 3.12. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi	38

Şekil 3.13. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi	38
Şekil 3.14. $Re_d = 875$, $R_h = \%45$ ve farklı T_{hg} ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi.....	39
Şekil 3.15. $T_{hg} = 45^\circ C$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi	40
Şekil 3.16. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi	40
Şekil 3.17. $Re_d = 875$, $T_{hg} = 30^\circ C$ ve farklı R_h ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi	40
Şekil 3.18. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi	41
Şekil 3.19. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi.....	41
Şekil 3.20. $T_{hg} = 30^\circ C$, $R_h = \%45$ ve farklı Reynolds sayılarında karlanma kalınlığının zamana göre değişimi	42
Şekil 3.21. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı üzerindeki etkisi	43
Şekil 3.22. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi	43
Şekil 3.23. $Re_d = 875$, $R_h = \%45$ ve farklı T_{hg} ' lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi.....	44
Şekil 3.24. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı üzerindeki etkisi	45
Şekil 3.25. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi	45
Şekil 3.26. $Re_d = 875$, $T_{hg} = 30^\circ C$ ve farklı R_h ' lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi.....	46
Şekil 3.27. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi	46
Şekil 3.28. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi	46
Şekil 3.29. $T_{hg} = 30^\circ C$, $R_h = \%45$ ve farklı Reynolds sayılarında karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi	48
Şekil 3.30. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi	48
Şekil 3.31. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi	48
Şekil 3.32. $Re_d = 875$, $R_h = \%45$ ve farklı T_{hg} ' lerde karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi.....	49

Şekil 3.33. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi	49
Şekil 3.34. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi	49
Şekil 3.35. $Re_d=875$, $T_{hg} =45^\circ\text{C}$ ve farklı R_h' lerde karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi.....	50
Şekil 3.36. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi	50
Şekil 3.37. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi	51
Şekil 3.38. Bağımsız parametrelerin ortalama Nusselt sayısı ve karlanma kalınlığı üzerindeki etki oranları.....	51

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Veri toplayıcısı ve ölçüm aletleri bağlantıları	19
Resim 2.2. Sirkülasyonlu su banyosu.....	19
Resim 2.3. Kamera	20
Resim 2.4. Ahlborne K-tipi ısıt çiftler	20
Resim 2.5. Radyal fan.....	21
Resim 2.6. Frekans konvertörü	21
Resim 2.7. Anemometre	22
Resim 2.8. Nemlendirme ünitesi.....	23
Resim 2.9. Nem alma ünitesi	23
Resim 2.10. AC güç kaynağı	24
Resim 2.11. Nem cihazı.....	24
Resim 2.12. Nem Ölçer	25
Resim 3.1. Karlanma kalınlığının zamana göre değişimi.....	36
Resim 3.2. Karlanma kalınlığının zamana göre değişimi.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R_h	Bağıl Nem (%)
L	Boru boyu (mm)
d_2	Boru dış çapı (mm)
d_1	Boru iç çapı (mm)
t_b	Boru et kalınlığı (mm)
hy	Boyutsuz boru boyu (-)
Fo	Fourier sayısı (-)
mL_{giz}	Gizli ısı (kW)
T_{hg}	Hava giriş sıcaklığı (°C)
Q	Isı transferi (W)
δ	Karlanma kalınlığı (mm)
ρ	Karlanma yoğunluğu (kg/m ³)
τ_y	Kayma gerilmesi (N/mm ²)
Le	Lewis sayısı (-)
θ	Momentum kalınlığı (mm)
Nu	Nusselt sayısı (-)
Nu_R	$Nu_{m,\text{ön}} / Nu_{m,\text{arka}}$ (-)
$Nu_{m,t}$	Ortalama Nusselt sayısı (-)
Pr	Prandtl sayısı (-)
Re_d	Reynolds sayısı (-)
m_s	Sıvı debisi (kg/s)
T_a	Sıvı sıcaklığı (°C)
C_f	Sürüklenme katsayısı (-)
H	Şekil faktörü (-)
h_y	Yerel ısı transfer katsayısı (W/m ² K)

GİRİŞ

Endüstride düşük sıcaklık ısı değiştiricisi uygulamaları hava ayırırma sistemleri, enerji depolama sistemleri, güç iletim hatları, doğalgaz sıvılaştırma sistemleri, MEMS (mikro elektromekanik sistem) soğutucuları, havacılık ve uzay sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda meydana gelen don tabakasının olumsuz etkilerini azaltmak için buzlanma özellikleri (Sheng vd., 2017), buzlanmayı önleme ve geciktirme (Amer & Wang, 2017) ve buz çözme mekanizmaları ile yöntemleri (Léoni vd., 2016) üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Su buharı ve soğuk yüzeyler arasındaki ısı ve kütle transferi sürecinin ürünü olarak don meydana gelebilir. Don tabakası oluşumu havacılık uygulamaları, ısı pompaları ve ısı değiştiricileri gibi birçok endüstriyel uygulamaların çalışma performansını etkileyen önemli bir fiziksel olaydır (Sheng vd., 2017). Don tabakası bir termal bariyer görevi görür ve akış direncine katkıda bulunarak ısı transfer performansını ve enerji verimliliğinin önemli ölçüde azalmasına sebep olur. Bu nedenle don tabakasının büyüme davranışı ile ısı ve kütle transferinin doğru bir şekilde belirlenmesi endüstriyel ekipmanların tasarlanmasında önemlidir (K. Lee, 2003).

Bu çalışmanın amacı silindirik bir boru etrafında meydana gelen don tabakasının ısı transferine olan etkisini deneysel olarak belirlemektir. Beş ana bölümden oluşan bu tez çalışmasının birinci bölümünde, endüstriyel uygulamalarda meydana gelen don tabakası hakkında genel bilgiler vermektedir. İkinci bölüm, literatürde yer alan silindirik ve düz yüzeylerde meydana gelen don tabakası oluşumunu içeren deneysel ve sayısal çalışmalar ile birlikte kuramsal temeller hakkında bilgiler içermektedir. Ayrıca don tabakasının ısı transferine olan etkisi belirlenirken kullanılan deneysel veriler ve formülleri kapsamaktadır. Üçüncü bölümde, deney sistemi ve kullanılan ekipmanlar ile birlikte deneylerin nasıl gerçekleştirildiği, deneylerde ölçümlerin nasıl elde edildiği yer almaktadır. Beşinci bölümde çalışmada elde edilen bulgular yer almaktadır. Altıncı bölüm de ise çalışmanın sonuçları ve önerilerine yer verilerek tez çalışması sonlandırılmıştır.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

1.1. Literatür Araştırması

Karlanma ve buzlanma üzerine yapılan çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Atmosferik aerosollerin karlanma oluşumuna etkisi deneysel olarak incelemiştir. Aerosolün buz oluşumunun başlamasındaki etkisini incelemek için bir yüzey üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve buz çekirdeklenmesi gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlarda yüzey katyonlarının değişmesi durumunda yüzey üzerinde meydana gelen karlanma aktivitesinin değişebileceği belirlenmiştir (Lata, 2021).

Kanatlı borulu ısı değiştiricisi üzerinde meydana gelen karlanma sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada Ansys Fluent paket programı kullanılmıştır. Isı değiştiricisini 5 kanatlı 3 sıralı bölümü için modelleme gerçekleştirilmiştir. Dış hava akış alanı 30x60x120 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma iç akışkan sıcaklığı 270 K ve kütleli debisi 0,278 kg/s, dış hava sıcaklığı 275 K değerlerinde gerçekleştirilmiştir. 720 saniyelik sayısal sonuçlar maksimum buz büyümesinin doğrudan gelen havaya bakan bölgede gerçekleştiğini ve kanat boyunca aşağı doğru hareket ettikçe azaldığını göstermiştir. Ayrıca deneysel ve sayısal sonuçlar göstermiştir ki, kanatçık ve boru üzerinde su buharının kütle akış hızı arttığında, üzerinde akan havanın hızı arttıkça kanat yüzeyindeki buz birikiminin arttığı gözlemlenmiştir (Hervatte, 2021).

Farklı ıslanabilirliğe sahip yüzeylerdeki karlanma büyümesi karışım modeli kullanılarak nümerik olarak incelenmiş ve literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada karmaşık geometriler üzerindeki don gelişimini tahmin etmek için sayısal bir model geliştirilmiştir. Giriş hızı sırasıyla 0,1, 0,3, 0,5 m/s, bağıl nem sırasıyla %40, %60, %80, giriş sıcaklığı sırasıyla 5, 10, 15 °C ve yüzey sıcaklığı sırasıyla 15, 10, 5 °C değerinde sayısal çözümler gerçekleştirilerek karlanma büyümesi tahmin edilmiştir. Tahmin edilen karlanma büyüme oranının, benzer koşullar altında literatürdeki deneysel verilerle iyi bir uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Modelin, yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı, nem ve akış hızı değiştikçe donun makul büyüme eğilimini tahmin ettiği ortaya koyulmuştur (Shahane vd., 2021).

Düşük sıcaklık koşulları altında karlanma davranışını tahmin etmek için sayısal bir model geliştirilmiş ve sonuçlar modelin geçerliliğini doğrulamak için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Geleneksel yoğuşma-dondurma yerine süblimleşme baskın karlanmayı ortaya koyan bir model geliştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma -130 °C yüzey sıcaklığı, 15 °C hava giriş sıcaklığı, 2 m/s hava hızı ve 7,35 gr/kg hava mutlak nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Hava girişinde, soğuk plaka yakınında yüksek yoğunluklu karlanma, hava çıkışında, yüksek yoğunluklu karlanma ve çevresinde düşük yoğunluklu ikincil karlanma

bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Sayısal model maksimum %10'luk bir hatayla deneysel verilerle uyusmaktadır (Byun vd., 2020).

Süperhidrofobik yüzeylerde buz oluşumu ve yayılma mekanizmalarını deneysel olarak incelenmiştir. Buz köprüsü, kademeli donma, don halesi ve damlacık patlaması gibi donma yayılımının mekanizmalarını özetlemiş, karşılaştırmış ve her mekanizmanın oluşması için uygun koşulları sunmuştur. Deneyler -10 ila -30 °C yüzey sıcaklıkları, %60 bağıl nem, 120° ve üzerindeki temas açılarında yapılmıştır. Araştırma neticesinde, donma yayılımını kontrol etmek için mekanizmadan bağımsız olarak birbirinden ayrı kondensatlara sahip olmanın gerektiği görülmüştür. Su damlacıklarının geometrik boyutunun uygun tasarımlarla kontrol edilmesi vasıtasıyla karlanma yayılımının önlenebileceği veya yavaşlatılabileceği gözlemlenmiştir (Azimi Yancheshme vd., 2020).

Bir yüzeydeki buz çekirdeklenmesi ve büyümesinin fiziğini teorik olarak incelenmiştir. Yüzey faktörü, yüzey geometrisinin yani nano veya mikronun yanı sıra yüzey serbest enerjisinin bir fonksiyonu olduğu ortaya koyulmuştur ve bu parametrelerin değiştirilmesiyle buz çekirdeklenmesinin kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Buz çekirdeklenmesine müteakip buz büyümesi metotları da ortaya konulmuştur (Hakimian vd., 2020).

Çoklu borulu ısı değiştiricisinin karlanma özellikleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yoğuşabilir katkı maddesinin buzlanma süreci üzerindeki etkisini analiz etmek için, çeşitli nem, hava hızları ve soğutucu sıvı sıcaklıkları altında farklı püskürtme oranları kullanılmıştır. Bağıl nem % 27,5 – 71, hava akış hızı 0 – 30 m/s, yüzey sıcaklığı 77 – 240 K deney aralıkları belirlenmiş, katkı maddesi sprey oranları 1:0,05, 1:0,1, 1:0,2 olarak seçilmiştir, katkı maddesi olarak etanol kullanılmıştır. Yoğuşabilir katkı maddesi ile donma önleyici buzlanma işlemi ve saf su karşılaştırılmıştır. Yoğunlaşabilir katkı maddesi içeren bileşiğin karlanma tabakasının yoğunluğu ve kalınlığının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek hava hızları altında, ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşünün büyük ölçüde arttığı, karlanma tabakasının, daha yüksek ortalama hava sıcaklığı ve daha yüksek hava hızı ile incelendiği gözlemlenmiştir (Qin, Chen, vd., 2020).

Manyetik alan içerisinde bulunan soğuk bir yüzey üzerindeki suyun donma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bir soğutma platformu manyetik alan içerisine yerleştirilmiş ve içinden soğutucu akışkan geçirilirken üzerinde bulunan plakadaki buz oluşumu mikroskoplar vasıtasıyla gözlemlenmiştir. Hava sıcaklığı 25 °C, bağıl nem %5-95, manyetik jeneratörler arasındaki mesafe sırasıyla 50, 80, 110 mm, manyetik alan sırasıyla 38, 18, 9 mT, yüzey sıcaklığı -5, -26 °C olarak belirlenmiştir. Manyetik alanın donma süreci üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve manyetik akı yoğunluğunun artmasıyla faz değişim kuvvetinde bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buz tabakasının kalınlığı manyetik olmayan bir koşuldakinden daha ince olduğu gözlemlenmiştir (Qin, Dong, vd., 2020).

Zorlanmış konveksiyon koşulları altında düşük sıcaklıktaki yüzeylerde karlanma tabakasının büyüme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma -100, -160, -130 °C yüzey sıcaklığı, %50 bağıl nem, 10 °C sıcaklık ve 1,75 - 1 - 2,5 m/s hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Buz tabakalarının, soğutma yüzeyinin ön ve arka kenarlarında ayrı ayrı oluştuğu, buzlanmanın erken safhasında düzensiz büyüklükte, çalı şeklinde don kristallerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki soğutma yüzeyi sıcaklığı azaldıkça, ortalama karlanma kalınlığı azalmış, hava hızı arttıkça, ortalama karlanma kalınlığı artmış, mutlak nem arttıkça, karlanma tabakasının ortalama kalınlığını artmış, hava sıcaklığı arttıkça ortalama karlanma kalınlığı azaltmıştır (J. Lee vd., 2019).

Rüzgâr türbin panellerinde buz birikim tahmini üzerine nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve güç üretim kayıplarını düşürmek için aerodinamik şekil iyileştirme önerilmiştir. NACA 64618 ve NACA 0012 kanatlar üzerinde, 4 - 5° hücum açısı, 25,7 ve 58.1 m/s hava hızı, 0,2 - 1,3 gr/m³ su içeriği, -2,8, -27,8 °C arasındaki sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen buz şekilleri literatürde bulunan deneysel ve sayısal veriler ile doğrulanmıştır. Şekil optimizasyonu sonucunda temiz profil için güç üretimi sabit kalırken buzlanmaya bağlı güç kaybı %4 oranında iyileştirilmiştir (Ozcan, 2018).

Kaygan yüzeylerin buzlanma ve buz çözme davranışı ve buz çözme performansını artırmak için mekanik titreşim kullanımı üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Kaygan yüzeylerin buzlanma ve buz çözme özellikleri, alüminyum, hidrofilik ve süperhidrofobik yüzeyleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma -5, -10 °C sıcaklık, %85 bağıl nem, 3 m/sn hava hızı, 60 dk bekleme süresi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma yüzeyi alanı 7 x 7 cm, karlanma ölçümlerinin alındığı alan 4 x 4cm, vibrasyon değerleri ise 40 Hz frekans ve 1 mm genlik olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kaygan yüzey diğer yüzeylere kıyasla daha iyi bir donma geciktirme performansına sahiptir. Kaygan yüzey üzerinde tutulan su süperhidrofobik yüzey üzerinde tutulan suyun %80 'i kadardır. Isıtma ve mekanik titreşim koşullarında kaygan yüzeyin buz çözme süresinde %40'lık bir iyileşme gözlemlenmiştir (Heu vd., 2018).

Düz plaka üzerindeki karlanma oluşumu ve gelişimi üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Deneysel veriler, kapalı döngü bir rüzgâr tüneli içinde akan nemli hava ile 300 x 300 mm² lik bir alüminyum levha üzerinde elde edilmiştir. Hava hızı 1 ile 4 m/s arasında, hava sıcaklığı 5 ile 16 °C arasında, hava bağıl nemi %50 ile %80 arasında ve levha sıcaklığı -25 ile 0 °C arasında değişmektedir. Karlanma kalınlığı ve iletkenliği için güvenilir tahmin yöntemleri tanımlanmıştır ancak karlanma yoğunluğunun tahmin edilmesi için korelasyonların iyileştirilmesi gerekmektedir. Çalışma aynı zamanda don biriktirme mekanizmalarında kristal şeklinin önemli rolünü vurgulamaktadır (Leoni vd., 2017).

Faz değişimine dayalı bir buzlanma modeli ortaya koyulmuştur. Gibbs serbest enerjisine dayanan bu model Euler çok fazlı akış yöntemiyle birleştirilerek yerel don oluşumu ve nemli hava akış özellikleri Ansys Fluent yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. 10 x 20 x 140 mm ve 5 x 25 x 50 mm kanal ölçülerinde çalışılmıştır. Yüzey sıcaklığı -5 ile -20 °C arasında, hava

sıcaklığı 21,4 ile -5 °C arasında, havanın bağıl nemi %85 ve %35, havanın hızı 0,92 ile 0,3 m/sn arasında değişmektedir. Veriler literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Model deneysel sonuçları -%25 ile +%30 sapma oranlarında tahmin etmiştir (Wu, Chu, vd., 2017).

Çeşitli ıslanabilirliklere sahip katı yüzeylerde belirgin buz desenlerinin oluşumu üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada, çekirdeklenmenin etkisinden kaçınmak için özel olarak tasarlanmış bir süreç kullanılarak elde edilen deneysel gözlemler rapor edilmiş ve atmosferik koşullar altında katı yüzeyler üzerindeki ıslanabilirliğe bağlı buz morfolojisi ve iki buz kristali büyüme modunun keşfi tanımlanmıştır. Yüzey sıcaklığı -15 °C, kontak açısı 107,3° ve 14,5°, basınç 1 bar olarak belirlenmiştir. Çalışma atomistik moleküler dinamik simülasyon analizini kullanarak, farklı buz büyümesi fenomenlerinin, farklı ıslanabilirliğe sahip katı yüzeyler üzerinde iki katmanlı buzun varlığına (veya yokluğuna) atfedilebileceğini göstermiştir (J. Liu vd., 2017).

Aşırı soğutulmuş bir su damlasının etkisiyle pürüzsüz veya pürüzlü soğuk bir yüzeyde buz oluşumu üzerine teorik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma gerçekçi Reynolds, Froude, Weber, Stefan sayılarında nispeten küçük zamanlar için ele alınan buz yüzeyinin büyümesi ve damlacık hareketinin tam doğrusal olmayan etkileşimini incelemektedir. Çalışma neticesinde ana bulgular şöyledir. Birincisi, buzlanma dinamik olarak damlacıkların yayılmasını hızlandırabilir veya yavaşlatabilirken, pürüzlülük kendi başına yayılmayı yavaşlatma eğilimindedir. İkincisi, baskın fiziksel etkilere odaklanmanın içinde sınırlı türbülans bölgelerinin ima edildiği bir çoklu yapıyı ortaya çıkaracağı bulunmuştur (Elliott & Smith, 2017).

Buz tabakası kalınlığının ölçümü ve hesaplanması üzerine teorik olarak çalışılmıştır. Buzlanma ve buz çözünme döngüsünü doğru bir şekilde tahmin etmek ayrıca kontrol etmek için buz tabakasının kalınlığının ölçüm yöntemlerini ortaya koymuşlardır. Çalışmada don tabakası kalınlığı çalışmalarının incelemesi ve karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Buzlanma araştırmalarındaki mevcut boşluklar belirlenmiş ve yazarların önerileri sonuçlar kısmında belirtilmiştir. Çalışma sonucunda don tabakası kalınlığı ölçümü ve hesaplamasının endüstri uygulamaları ile birleştirilmesi, basitleştirilmiş ve etkili korelasyonların endüstri uygulamasına dayalı olarak daha fazla araştırılması gerektiği belirtilmiştir (Mengjie vd., 2017).

Kanatlı borulu ısı değiştiricisi yüzeyindeki buzlanmanın nümerik simülasyonu üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada Ansys Fluent yazılımında kullanıcı tanımlı bir fonksiyon (UDF) olarak uygulanan kütle transfer modeli kullanılarak kanatlı borulu ısı değiştirici yüzeylerindeki don büyümesi ve yoğunlaşma süreçleri sayısal olarak incelenmiştir. Boru dış çapı 8 mm, boru kalınlığı 0,15 mm, boru adımı 22 mm, kanat uzunluğu 38,1 mm, kanat adımı 1,5 mm, kanat kalınlığı 0,11 mm olarak seçilmiştir. Gözlemler; -5 °C boru yüzey sıcaklığı, 2 °C hava sıcaklığı, %85 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı ve 50 dk'lık donma süresi değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Tahmin edilen basınç kaybı ile deney sonuçları arasında -%12,5' lik bir fark gözlemlenmiş olup simüle edilen don dağılımı ile deneysel veriler iyi bir uyum sağlamıştır (Wu, Ma, vd., 2017).

Süperhidrofobik yüzeylerde buz oluşumu için tahmine dayalı model üzerinde çalışılmıştır. Çalışmadaki modelleme yaklaşımı, damlacık çarpma dinamiklerini, ısı transferini ve heterojen buz çekirdeklenmesini tanımlayan alt modellerin geliştirilmesi yoluyla süperhidrofobik yüzeylerde buz oluşumunu etkileyen çoklu fenomenleri analiz etmiştir. Çalışmada, 20, 60, 0, -5 °C' ye aşırı soğutulmuş 2,5 mm çapındaki su damlacıkları, kontrollü alt yüzey sıcaklıklarında (-35 ila 20 °C) süperhidrofobik yüzeylere etki etmiş, deneyler oda sıcaklığında ve %5 bağıl nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Su damlacıkları 10 cm yükseklikten serbest bırakılmış ve yüzeylere 90° açıyla çarptırılmıştır. Çalışmalar sonucunda modelin, yüzey morfolojisinin, yüzey kimyasının ve sıvı ve termal özelliklerin dinamik buz oluşumu üzerindeki etkisini incelemek ve buzobik yüzeyler elde etmek için kritik olan parametreleri belirlemek için kullanılabileceği ortaya konmuştur (Bahadur vd., 2011).

Teorik olarak gözenekli ortamda buz oluşumunu incelenmiştir. Bu çalışmada, doymuş gözenekli ortamlarda donma ve çözülme süreçlerinin tarifine yönelik Gözenekli Ortam Teorisi'ne (TPM) dayalı makroskobik bir model sunulmuştur. Bu çalışmada kapiler emme, çevreleyen yüzeylerdeki sıvı ve gaz basıncı, buz oluşumuna bağlı hacim deformasyonları, sıcaklık dağılımı ve termal yüklem altında füzyon ısısının etkisine dikkat edilmiştir. Su ve buzun faz geçişinin kontrolü ile ilgili enerjik etkilerin tespiti için, ısı akışının yerel sapmasına dayalı kütle değişimi için fiziksel olarak motive edilmiş bir evrim denklemi kullanılmıştır. Modelin uygulamalarına sayısal örnekler sunulmuştur (Bluhm vd., 2011).

Dikdörtgen bir kaptay yatay bir tüp etrafında buz oluşumunu deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma çerçevesinde farklı ısı transfer akışkanı sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisini incelemek için deneyler yapılmıştır. Deney süresince boru etrafındaki buz kalınlığı farklı eksenel pozisyonlarda ölçülmüş ve boru etrafındaki buz oluşumunu tespit edebilmek için bir matematik model oluşturulmuştur. Deneyler için ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı -4.3, -4.9 ve -5.8 °C, debisi 0 ile 1000 lt/saat arasında, boru dış çapı 16 mm, boru uzunluğu 0 ile 4 m arasında seçilmiştir. Buz kalınlığını ölçmek için Nikon Coolpix 8700 (8MP, 10x optic zoom) model dijital kamera kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda, Tüm ısı transfer akışkanı sıcaklıklarında deneysel sonuçlarla model sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Fertelli vd., 2009).

Buz oluşumunun fiziksel tabanlı simülasyonu üzerine teorik olarak çalışılmıştır. Çalışmada, buz oluşumunu görsel olarak simüle etmek için birkaç yöntem sunulmuştur. Bu noktada faz alan yöntemleri, difüzyon sınırlı toplama ve seviye kümesi yöntemleri kullanılmış, faz alanlarını difüzyon sınırlı toplama (DLA) ile birleştiren bir hibrit yöntem sunulmuştur. Model tarafından ortaya koyulan buz oluşumu şekilleri literatürdeki çeşitli deneysel görsellerle karşılaştırılmıştır. Çalışma neticesinde iki algoritmanın birleştirilmesiyle, hiçbir yöntemin tek başına yakalayamayacağı görsel özellikler üretilmiştir (Kim, 2006).

Doğal konveksiyon koşulu altında donma önleyici boya kullanılarak soğuk bir yüzey üzerindeki karlanma oluşumu üzerine deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneyler 150 x 52 x 6 mm boyutlarındaki bakır bir plaka üzerine gerçekleştirilmiştir. Çalışma parametreleri 26 °C ortam sıcaklığı, %60 bağıl nem, -18.3 °C yüzey sıcaklığı, 30, 60, 100 dakikalık bekleme süreleri olarak belirlenmiştir, ayrıca uzun süreli ve tekrarlanan sonuçları gözlemek için 15, 40, 55 günlük sürelerde değerlendirilmiştir. Buz tabakasının yüzey sıcaklığını ölçmek için bir NEC TH5102 kızılötesi termograf kullanılmıştır. Çalışma sonucunda polimer boya üzerinde oluşan don tabakasının çok gevşek, zayıf ve dış kuvvetle kolayca kaldırılabilen kırılğan bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiş olup, uzun süreli incelemeler için en az 15 kez tekrarlanan deneylerden sonra, kaplamanın donma önleme performansında kayda değer bir bozulma gözlemlenmemiştir (Z. Liu vd., 2006).

Soğuk bir yüzey üzerinde türbülanslı akış koşullarında karlanma oluşumunu tahmin eden matematiksel bir model üzerine çalışılmıştır. Model, türbülanslı akış için standart κ - ϵ modelinden ve don tabakası için difüzyon denkleminde oluşmaktadır. Çalışmada hava giriş sıcaklığı 10, 15 °C, mutlak nem 0.00633 kgsu/kg hava, hava hızı 1, 2.5, 9, 15 m/sn, yüzey sıcaklığı -15 °C olarak belirlenmiştir. Çalışma neticesinde, türbülanslı akışın laminer akışa kıyasla soğuk yüzeydeki don tabakasının büyümesini desteklediği gözlemlenmiştir. Hava hızındaki artışın ise yine türbülanslı akışta, laminer akışa kıyasla karlanma büyümesi üzerine çok daha az etkisi olduğu sonucuna varılmıştır (Yang vd., 2006).

Doğal ve cebri hava akışlarının etkilediği soğuk bir yüzey üzerindeki yerel don oluşumu üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Çalışmalar doğal hava akışı, 1510 ve 4980 Re sayılarında, 18.8 ile 25.3 °C arasındaki hava giriş sıcaklıklarında, 740 ile 1120 W/m² arasındaki ısı akışlarında, 1,1 ile 17 °C arasındaki çiy noktası sıcaklıklarında alüminyum bir plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Don yüzeyi CCD kamera ile gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda ilk periyotta don tabakasının yavaş büyüdüğü, acerose şekilli buz kristallerinin büyümesi ile don tabakası kalınlığının hızla arttığı, daha sonra yüzeydeki sütun şeklindeki buz kristallerinin oluşumuyla don tabakası kalınlığının alternatif olarak hızlı ve yavaş bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Qu vd., 2006).

Soğuk bir plaka üzerinde oluşan donun özelliklerini tahmin eden boyutsuz korelasyonlar üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Çalışmalar 5 ile 15 °C arasındaki hava sıcaklıkları, 1 ile 2,5 m/sn arasındaki hava hızları, 0,00322 ile 0,00847 kgsu/kg hava arasındaki mutlak nemler ve -35 ile -15°C arasındaki soğutma plakası sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 300 x 150 x 150 mm boyutlarındaki test bölmesinde yapılmıştır. Çalışma neticesinde önerilen korelasyonlar deneysel sonuçlardan maksimum %10' luk bir sapma göstermektedir (Yang & Lee, 2004).

Don oluşumu sürecinde ısı değiştiricilerin ısı ve kütle transfer özellikleri üzerine teorik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve sonuçları literatürde bulunan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmalar -25, -30, -35 °C yüzey sıcaklığı, % 50, 60, 70 bağıl nem, 10, 15, 20, 25 lt/sn hava

debisi, 10mm kanat adımı, -10, -15, -20 °C hava giriş sıcaklığı parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda geliştirilen modelin uygulanabilir geometrilere literatürdeki deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir (Seker vd., 2004).

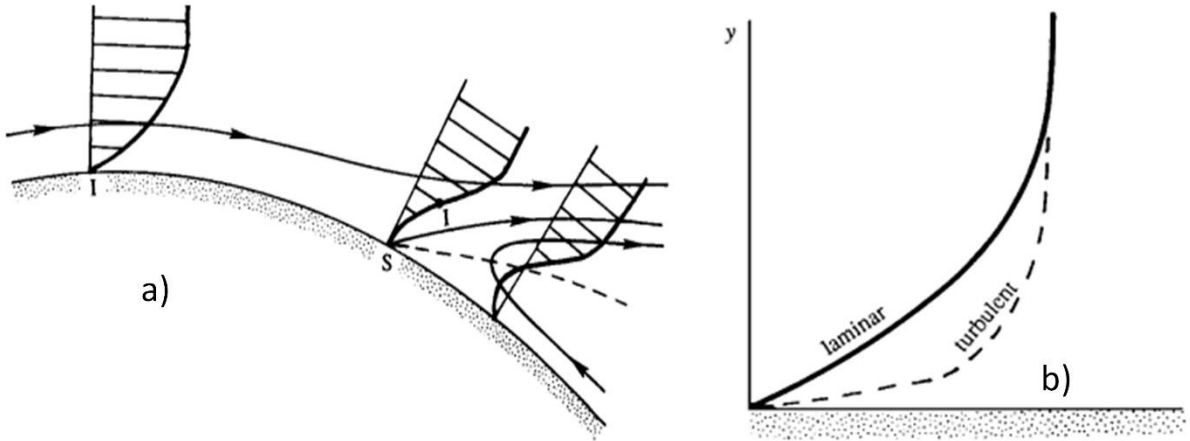
Atmosferik havada soğuk bir levha üzerinde oluşan don kristallerinin modelleri ve don kalınlığı üzerinde deneysel olarak çalışılmıştır. Don kristallerinin yapısını görüntülemek için mikroskopik bir görüntü sistemi kullanılmıştır. Çalışmaların yapıldığı parametreler; 2 ile 8 ms/sn arasında hava hızı, 18 ile 30 °C arasında hava sıcaklığı, %40 ile %70 arasında bağıl nem ve -18 ile 0 °C arasında yüzey sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Deneyler 300 x 300 x 5500 mm ölçülerindeki bir rüzgâr tüneline, yüzey pürüzlülüğü 0,57 µm olan 55 x 55 x 8 mm ölçülerindeki bakır plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, soğuk plakanın ön kenarında, don kristallerinin sadece soğuk plakaya dik yönde değil, aynı zamanda hava akımı yönünün tersi yönünde de büyüdüğü, radyal yönde büyüyen don kristallerinin ise hücum kenarında hava akımıyla aerodinamik hale gelen bir yuvarlak kafa oluşturduğu, don tabakasının yapısının farklı şekiller ve büyüme oranları sergileyen, rastgele ve tahmin edilemez don kristallerinden oluştuğu ve hava hızı yükseldikçe don kristallerinin oluşma hızının arttığı gözlemlenmiştir (Cheng & Shiu, 2002).

Bu tez çalışmasında, silindirik bir boru etrafında meydana gelen karlanma ve donmanın ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İç çapı 10 mm ve dış çapı 14 mm olan boru alüminyumdan imal edilmiştir. Silindirik boru 150 mm genişliğe, 140 mm yüksekliğe ve 2500 mm uzunluğa sahip şeffaf pleksi malzemedan imal edilen hava akış kanalına yerleştirilmiştir. Deneyler havanın 300, 506, 875, 1124 ve 1426 Reynolds, hava bağıl neminin %30, %45, %55, ve hava sıcaklığının 15°C, 30°C ve 45°C değerleri için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde silindirik boru hattında antifriz soğutma sıvısı akışkanı kullanılmıştır. Silindirik boru girişi 0,126 kg/s debide ve -30°C sıcaklık da sabit tutulmuştur. Deneyler esnasında her 5 dakikada bir fotoğraf görüntüleri kamera yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Görüntüler ImageJ programı yardımıyla işlenerek karlanma kalınlıkları belirlenmiştir.

1.2. Kuramsal Temeller

1.2.1. Silindir üzerinde akış ve ayrılma

Bir akışkanın bir katı cisim üzerinde akması durumunda akışkanın viskozitesinden dolayı katı cisim yüzeyinde sınır tabaka oluşur. Bu sınır tabaka katı cisim yüzeyi boyunca gelişerek ısı transferi ve sürtünme katsayısını önemli oranda etkiler. Sınır tabaka ve içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı çoğunlukla akış rejimi ve katı cisim geometrisine bağlıdır. Akış rejimi atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranı olan Reynolds sayısı ile belirlenir. Sınır tabaka içerisindeki hız dağılımı ve sınır tabakanın yüksekliğinde akış rejiminin laminar ya da türbülanslı olması önemli bir etkiye sahiptir. Sınır tabaka içerisinde viskoz kuvvetlerden dolayı yavaşlayan akışkan katı cismin belli bir uzunluğunda hız ters basıncın etkisi ile yaklaşık sıfır (0) olur. Bu durum bağıl olarak daha yüksek hıza sahip akışan partiküllerinin yüzeyden ayrılmasına neden olur. Ayrıca ters basınç alanından dolayı durma noktasından sonra, ayrılma bölgesinde ters akış bölgeleri de gözlenir (Şekil 1.1(a)). Katı cisim yüzeyine yakın akış, ters basınç gradientinin etkisi ile S noktasında ayrılarak yukarı yönlendirilir. Bu nokta (S) gerilmenin de ortadan kalktığı bölgenin başlangıcıdır.



Şekil 1.1(a). Bir S ayrılma noktası ve ayrılma bölgesi akım çizgileri ve hız profili. Burada I sınır tabakanın bükülme noktasıdır (Kundu vd., 2015), **(b)** sınır tabaka hız profili

Düşük Reynolds sayılarında ($4 < Re < 40$) ayrılma noktasının ötesindeki ters akış, yüzey ve ayrılma çizgisi arasında sabit girdabın oluşmasına neden olur. Ancak nispeten yüksek Reynolds sayılarında sınır tabaka ve onun oluşumu daha belirgin olmakta, kopma noktasının ötesinde akış kararsız ve kaotik olmaktadır. Buna bağlı olarak küt cisimlerde basınç gradyanı büyük, ayrılma hızlı olmaktadır. İnce cisimlerde ise basınç gradyanı nispeten küçük değerlerdedir.

Akış rejiminin laminar olması durumunda ayrılma noktasının Reynolds sayısından bağımsız olduğu yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır. Buna karşın türbülanslı rejimde sınır tabaka

içerisinde ters basınç gradyanına direnç daha fazladır. Bunun sebebi olarak türbülans sınır tabaka profili enerjisi laminer sınır tabakaya daha fazladır (Şekil 1.1.(b)). Bu durumda silindir üzerindeki laminer akış için sürüklenme katsayısı yaklaşık sabit kalmaktadır. Ancak akış rejimi türbülansa geçtiğinde sürüklenme katsayısında ani bir düşme gözlenir.

Hem laminer hem de türbülans sınır tabaka teorisi, iki boyutlu integral sınır tabaka ve Kármán denkleminin genişletilmesi ile kayma gerilmesi (τ_y), sürüklenme katsayısı (C_f) ve momentum kalınlığı (θ) arasında;

$$\frac{\tau_y}{\rho U^2} = \frac{C_f}{2} = \frac{d\theta}{dx} + (2 + H) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} \quad (1)$$

ilişkisi yazılabilir. Burada H şekil faktörüdür ve $H_x = \delta^*(x)/\theta(x)$ ile tanımlanır. Bernoulli denkleminin $(-dU/dx)=(+dP/dx)$ olduğu bilinmektedir. Ayrıca laminer ve türbülanslı akış için sınır tabaka hız profilleri göz önüne alınır ve H değeri ile ters gradyan değerinin doğru orantılı olduğu (H ne kadar yüksekse, ters gradyan o kadar güçlüdür) durum dikkate alınır ise;

$$H \cong \begin{cases} 3,5 & \text{Laminer akış} \\ 2,4 & \text{Türbülanslı akış} \end{cases} \quad (2)$$

eşitliği kullanılabilir. Thwaites tarafından boyutsuz bir momentum-kalınlık ilişkisi kullanılarak oldukça kullanışlı bir eşitlik elde edilmiştir (Kundu vd., 2015).

$$\lambda = \frac{\theta^2}{\nu} \frac{dU}{dx} \quad (3)$$

Thwaites elde etmiş olduğu bağıntıya düz çizgi uydurarak denklemin integrali ile kapalı formda;

$$\theta^2 = \theta_0^2 \left(\frac{U_0}{U} \right)^6 + \frac{0,45\nu}{U^6} \int_0^x U^5 dx \quad (4)$$

Burada θ_0 , $x=0$ 'da momentum kalınlığıdır ve bu noktada momentum kalınlığı sıfır alınır. Yukarıdaki tartışmaların ışığında Thwaites ayrılmanın, sürtünme katsayısı $C_f=0$ ve $\lambda= -0,009$ değerinde meydana geldiğini belirlemiştir. θ_0 , durma noktası olarak göz önüne alınır ise;

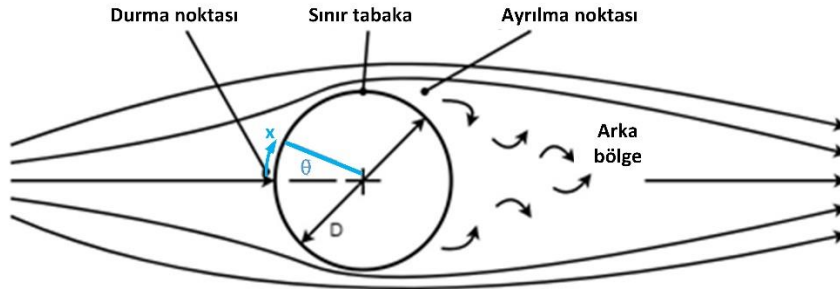
$$\theta^2 = \frac{0,45\nu}{U^6} \int_0^x U^5 dx \quad (5)$$

bağıntısından momentum kalınlığı belirlenebilir.

Silindir üzerinden belirli bir hızda geçen akışkan akımında;

- Durma noktası (silindir ön tarafı)
- Sınır tabaka (silindir çevresi)
- Ayrılma noktaları (silindir arka alt-üst bölgelerinde)
- Arka bölge (silindir arkası)

gibi dört ana bölge meydana gelmektedir (Incropera & DeWitt, 1996).



Şekil 1.2. Silindir üzerinde akış ve ayrılma bölgeleri

Silindir üzerinde meydana gelen hava akışı için yerel Nusselt sayısı θ ile değişmektedir (Şekil 1.2). Nusselt sayısı fiziksel olarak yüzeydeki sıcaklık gradyanı olduğu bilindiğine göre Nusselt sayısının sınır tabaka ve onun özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu da anlaşılabilir. Durma noktasından başlayarak, sınır tabakanın gelişmesine paralel olarak yerel ısı transferinde de azalma gözlenmektedir. Bu azalma silindir yüzeyinde yaklaşık 80° ye (akış ayrılma noktasına) kadar devam eder. Sonra ters akış ve akış karışmasının etkisi ile tekrar artar. Reynolds sayısı ile ısı transferi arasında doğru ilişki vardır. Bu ilişkide Reynolds sayısı ile sınır tabaka kalınlığı arasındaki ters orantının da etkisi bilinen bir durumdur. $Pr \geq 0,6$ için silindir durma noktasında;

$$Nu_d|_{\theta=0} = 1,15Re_d^{1/2}Pr^{1/3} \quad (6)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Incropera & DeWitt, 1996). Ayrıca çapraz akış şartlarında silindir etrafında akış için ortalama Nu sayısı Zhukasukas tarafından;

$$Nu_d = CRe_d^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_y} \right)^{1/4} \quad (7)$$

bağıntısı önerilmiştir. Bu bağıntı ($0,7 < Pr < 500$) ve ($1 < Re_d < 10^6$) şartlarında geçerlidir. Bu bağıntı için ilgili katsayılar Tablo 1.1' de verilmiştir. Burada Pr_y değeri T_y de hesaplanırken diğer değerler giriş sıcaklığında hesaplanmıştır. $Pr \leq 10$ değerlerinde $n = 0,37$ ve $Pr > 10$ değerlerinde ise $n = 0,36$ 'dır (Incropera & DeWitt, 1996). Churchill ve Berbstein $Re_D.Pr > 0,2$ için geniş kapsamlı bir bağıntı geliştirmişlerdir. Bu denklem;

$$Nu_d = 0,3 + \frac{0,6Re_d^{1/2}Pr^{1/3}}{[1+(0,4/Pr^{2/3})]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_d}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (8)$$

şekindedir. Burada tüm özellikler film sıcaklığında belirlenmiştir. Geliştirilen bu bağıntılar belirli aralıklar için güvenilir sonuçlar vermektedir. Morgan tarafından dairesel silindir için geliştirilen bağıntılar incelenmiştir.

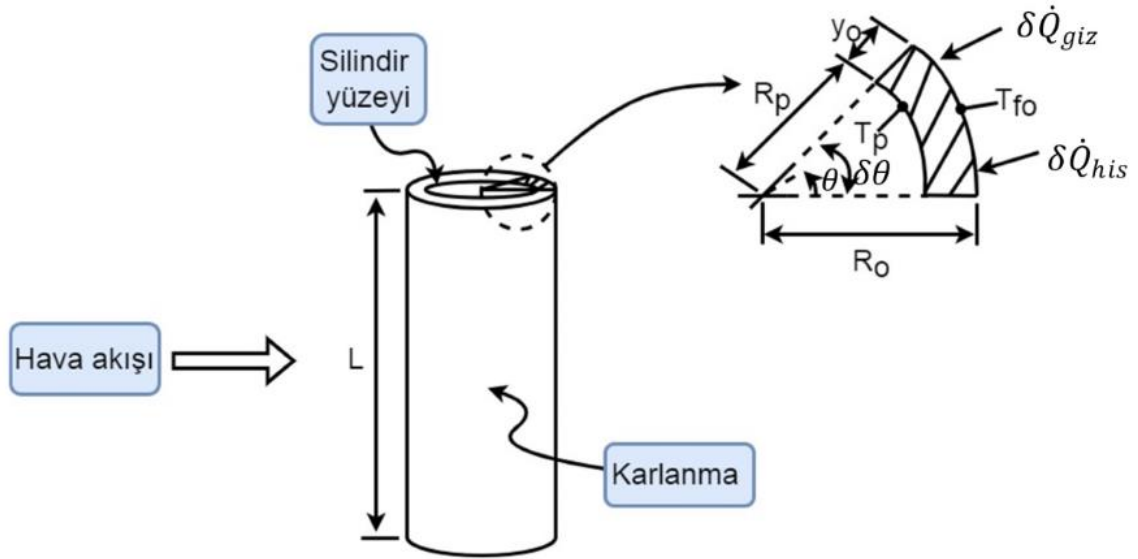
Tablo 1.1. Denklem (7) sabitleri (Incropera & DeWitt, 1996)

Re_d	C	m
1 - 40	0,75	0,4
40 - 1000	0,51	0,5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0,26	0,6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0,076	0,7

1.2.2. Deneysel bulguların hesaplanması

Karlanma ve ısı transferi analizleri, termal özelliklerdeki zamana bağlı değişime uğraması, ısı transferi ile eş zamanlı olarak kütle geçişinin gerçekleşmesi, konum ve karlanma-akışkan ara yüzünün sürekli değişmesinden dolayı karmaşık bir analiz içermektedir (K.-S. Lee vd., 2004). Bu bakımdan yapılan analizlerde istenen hata oranında kalmak şartı ile bazı kolaylaştırıcı kabuller yapılmıştır.

- Isı ve kütle transferi radyal yönde ve tek boyutludur.
- Isıl sistemin yarı kararlı durumda olduğu varsayılır.
- Karlanma yüksekliği ortalama özelliklere göre karakterize edilir.



Şekil 1.3. Silindir yüzeyindeki karlanmanın şematik gösterimi

$$\left[\begin{array}{c} \text{Silindir boru} \\ \text{yüzeyinden iletilen ısı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Hissedilir ısı} \\ \text{oranı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Stür değişimine bağlı} \\ \text{gizli ısı oranı} \end{array} \right]$$

$$\delta\dot{Q}_{his,k,\theta} + \delta\dot{Q}_{giz,k,\theta} = \delta\dot{Q}_{iletim,k,\theta} \quad (9)$$

Burada;

$$\delta\dot{Q}_{his,b\theta} = h_{\theta}LR_{\theta}\delta\theta(T_{hg} - T_{k,\theta}) + \varepsilon_{k,\theta}LR_{\theta}\delta\theta\sigma(T_{hg}^4 - T_{k,y,\theta}^4) \quad (10)$$

Karlanma başlamadan önce anlık olarak ışıyım yolu ile ısı transferi yüksek değere sahip olsa da çok kısa zaman sonra karalanma nedeni ile yüzey sıcaklığı 0°C'ye yaklaşmaktadır. Bu durum sıcaklık farkında azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca boru ısı transfer yüzey alanının test bölümü yüzey alanına göre oldukça küçük olması nedeni ile bu çalışmada, ışıyım yolu ile geçen ısı ihmal edilmiştir. O nedenle hissedilir ısı transferinin yalnızca taşınım yolu ile olduğu kabul edilmiştir.

Nemli hava ile doyma sıcaklığı altındaki soğuk yüzey arasındaki nem farkından kaynaklanan gizli ısı transferi;

$$\delta\dot{Q}_{giz,k,\theta} = h_{m,\theta}L_{giz,\theta}LR_{\theta}\delta\theta(w_h - w_{k,\theta}) \quad (11)$$

Boru boyunca gizli ısı; mL_{giz} olarak göz önüne alınabilir. Burada $w_{k,\theta}$ donma yüzeyi sıcaklığındaki doymuş mutlak nemdir. Isı ve kütle transferi arasındaki analogiden kaynaklanan kütle transfer katsayısı şu şekilde tanımlanır:

$$h_{m,\theta} = \frac{h_{\theta}}{c_{p,h}Le^{(2/3)}} \quad (12)$$

Burada Le ; Lewis sayısıdır.

$$Le = \frac{\alpha_h}{D_{f,h}} \quad (13)$$

Don oluşumu sırasında donma yüzeyi ile soğuma yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı Fourier ısı iletimi denkleminde uygulanır ise;

$$\delta\dot{Q}_{iletim,k,\theta} = \frac{k_{k,\theta}L\delta\theta(T_{k,\theta} - T_b)}{\log_e(R_{\theta}/R_b)} \quad (14)$$

Denklem (14)'teki karlanmanın ısı iletkenliği, (K. S.; Lee. T. H.; Kim. W. S. . Lee, 1994) tarafından çeşitli karlanma koşulları altında deney olarak türetilmiştir. Bu çalışmada da ısı iletkenliğinin hesaplanması için bu bağıntı kullanılmıştır.

$$k_{k,\theta} = 0,132 + 3,13 \times 10^{-4} \rho_{k,\theta} + 1,6 \times 10^{-7} \rho_{k,\theta}^2 \quad (15)$$

$$-25 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_{d,\theta} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$2 \text{ m/s} \leq V_h \leq 6 \text{ m/s}$$

$$w_h = 0,0075 \text{ kg/kg}_{DA}$$

Bu denklemde, karlanmanın ısı iletkenliği karlanma yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Karlanma yoğunluğu için literatürde büyük oranda kabul gören, (Hayashi vd., 1977) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

$$\frac{\rho_{k,\theta}}{\rho_{bz}} = 797,53 \times 10^{-6} \left(\frac{V_h}{V_{max}} \right)^{-0,0254} w_h^{-0,0254} \left[\exp \left(\frac{T_{k,\theta} - T_{ÜN}}{T_h - T_b} \right) \right]^{3,934} \quad (16)$$

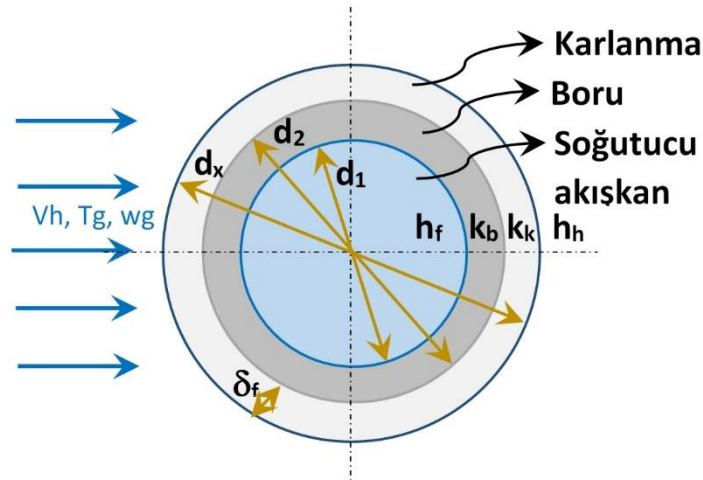
$$-35 \text{ } ^\circ\text{C} < T_b < -15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_h < 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$1 \text{ m/s} < V_h < 2,5 \text{ m/s}$$

$$0,00322 \text{ kg/kg}_{DA} \leq w_h \leq 0,00847 \text{ kg/kg}_{DA}$$

Bu bağıntının uygulama ile karşılaştırıldığında göze çarpan zayıf yönü bağıntının sadece doyma yüzey sıcaklığının fonksiyonu olarak türetilmiş olmasıdır (Hayashi vd., 1977). Bir diğer zayıf yönü ise sabit nem ile sınırlandırılması olsa da bu çalışmada sabit nem uygulanmasından dolayı bu kapsamda ortaya çıkabilecek hata miktarı ortadan kalkmıştır.



Şekil 1.4. Boru kesit görünüşü

Isı transferinin bir boyutlu gerçekleştiğine dair kabul yukarıda belirtilmiştir. Boru radyal doğrultuda gerçekleşen ısı geçişi için (Wang vd., 2013):

$$Q = \frac{q}{A_{ısıtma}} = \frac{\Delta T}{\sum R_{\Delta T}} = \frac{T_f - T_h}{\sum R_{\Delta T}} \quad (17)$$

Burada

$$\sum R_{\Delta T} = \frac{1}{h_f \pi d_1} + \frac{1}{2\pi k_b} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi k_k} \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{h_h \pi d_x} \quad (18)$$

eşitliklerinden yararlanılır.

Bu çalışmada yerel ve ortalama taşınım katsayılarının dolayısı ile yerel ve ortalama Nusselt sayılarının hesaplanması için boru boyunca farklı noktalardan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çalışma akışkanlarının termo-fiziksel özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Taşınım yolu ile transfer edilen ısı miktarı;

$$q = h_y(T_{hg} - T_y) \quad (19)$$

Bu eşitlikten ısı ortalama taşınım katsayısı

$$h_{m,t} = \frac{1}{L} \int_0^L h_y dy \quad (20)$$

Böylece ortalama Nusselt sayısı;

$$Nu_{m,t} = \frac{h_{m,t} d}{k_h} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_y dy \quad (21)$$

Burada yerel ısı taşınım katsayıları her saniyede 10 defa ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalamasına göre denklem (20) bağıntısından tespit edilmiştir. Ortalama Nusselt sayıları ise her bir zaman adımı için yerel Nusselt sayılarının ortalamasından hesaplanmıştır.

1.2.3. Hata Analizi

DeneySEL çalışma sonucunda elde edilen bulguların deneySEL belirsizliği ve hataları ölçüm ekipmanların doğruluğu ile ortaya çıkmaktadır. DeneySEL hatalar; rastgele meydana gelen hatalar, sabit hatalar ve kişisel hatalar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

Bu çalışmada, ölçümler hacimsel akış ölçer, sıcaklık, basınç ve nem sensörleri kullanılarak elde edilmiştir. Belirsizlik analizi, S., J., Kline. (1953) yöntemine göre hesaplanmıştır. Denklem (22) de belirsizlik denklemi sunulmuştur;

$$U_R = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial V_i} U_{V_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (22)$$

burada R bağımlı değişken ve V_i bağımsız değişkendir. U_R ve U_{V_i} bağımlı ve bağımsız değişkenler için belirsizliklerdir. Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin hata değerleri, deneylerde kullanılan ölçüm aletlerinin üretici firmaları tarafından hazırlanan katalog ve ölçümleme test değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Hata değerleri sıcaklık için $\pm 0,05$ nem sensörü için $\pm 1,3$ hava hızının 0,3 – 3 m/s değerleri için ± 3 ve 3,1 – 35 m/s değerlerinde hacimsel akış ölçer için ± 1 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1.2. Toplam hata miktarları

Ölçülen ve hesaplanan değerler	Toplam hata	
Kanal kesit alanı, A	% 0,1	
Fourier sayısı, $ Fo $	% 2,1	
	Re<5000	Re>5000
Nusselt sayısı, $ Nu $	% 3,5	% 1,1
Reynolds sayısı, $ Re $	% 4,1	% 3,6
Kütleli debi, $ \dot{m} $	% 1,4	% 3,1
Isı miktarı, $ Q $	% 3	% 1,1
Isı transfer katsayısı, $ h $	% 2,9	% 1,1

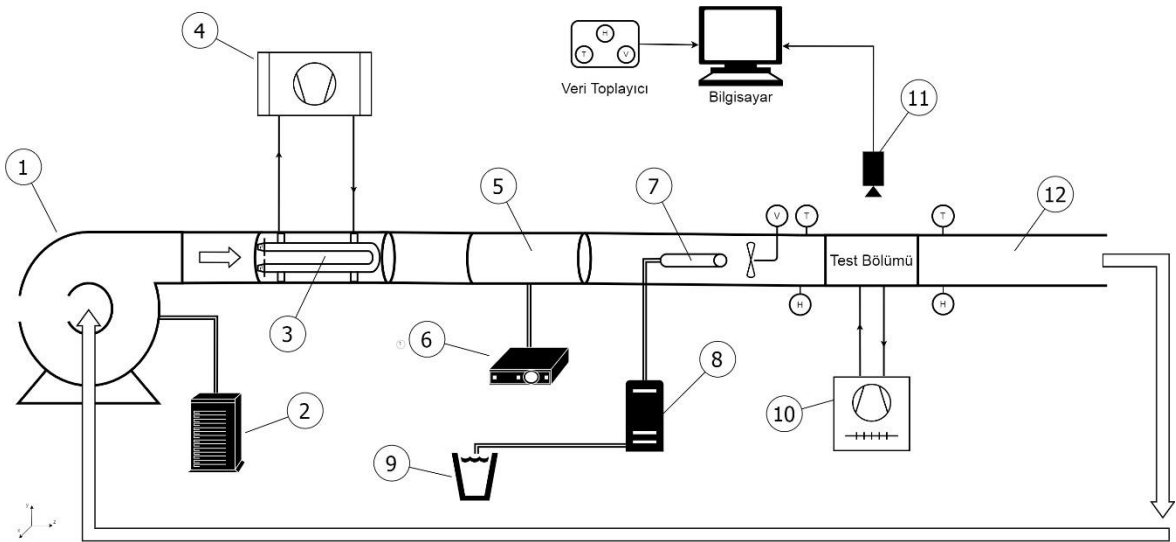
Deneyle sırasında meydana gelen toplam hata miktarları ölçülen ve hesaplanan değerler için Tablo 1.2' de verilmiştir. Hacimsel akış ölçerinin farklı hava hızları için hata değerleri farklıdır. Bu kapsamda Tablo 1.2' de Re<5000 ve Re>5000 değerleri için hata miktarları Nusselt sayısı, Reynolds sayısı, kütleli debi, ısı miktarı ve ısı transfer katsayısı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Nusselt sayısındaki belirsizliği hesaplamak için denklem (22) kullanılmıştır. Reynolds sayısı, kütleli debi, ısı miktarı, ısı transfer katsayısı, kanal kesit alanı ve Fourier sayısı için hesaplamalar EK-3' de sunulmuştur.

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

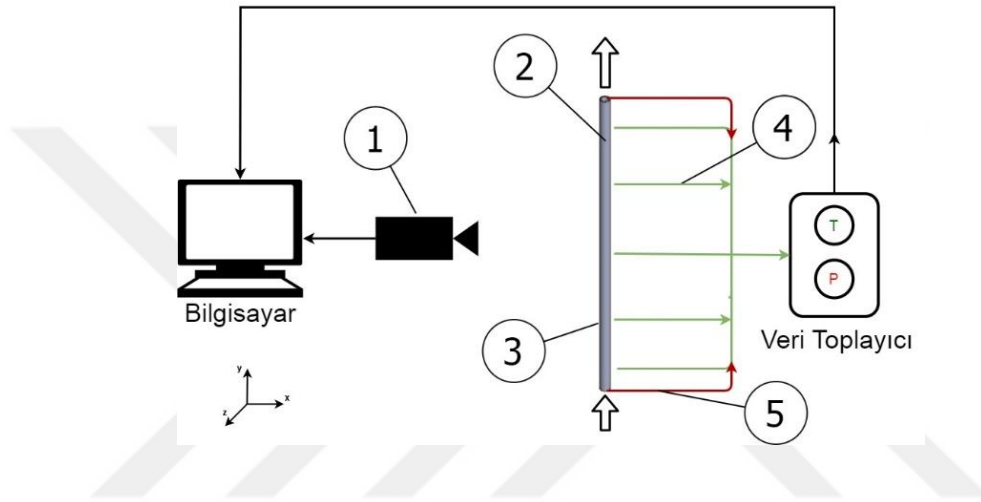
2.1. DeneY Sisteminin Tasarlanması ve İmalatı

DeneY sistemi Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. DeneY sistemi ölçme-kontrol ve test bölümü olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Frekans konvertörlü (2) radyal fan (1) devri değiştirilerek havanın debisi istenilen değerlere ayarlanarak akış kanalına (12) gönderilmektedir. Akış kanalı 150x140x2500 mm ebatlarında şeffaf pleksi levhadan imal edilmiştir. Sirkülasyonlu su banyosu (4) ile kontrol edilen ve akış kanalına yerleştirilen iklimlendirme ünitesi (3) ile düşük hava sıcaklıkları, DC güç kaynağı (6) ile kontrol edilen nem alma (5) ünitesi ile yüksek hava sıcaklık değerleri sağlanmıştır. Sirkülasyonlu su banyosu kontrol edilerek ve güç kaynağı üzerinde voltaj-amper ayarlaması yapılarak istenen hava sıcaklığı sağlanmıştır. Nemlendirme (7) ünitesine gönderilen havanın istenilen bağıl nem değerleri, şebeke su hattından (9) beslenen nem verme kontrol ünitesi (8) ile sağlanmıştır. Akış kanalına yerleştirilen anemometre (V) ile akışkan debisinin ölçümü gerçekleştirilerek havanın istenilen hız değerlerinde test bölümüne girişi sağlanmıştır. Hava debileri için LV107, radyal fan çıkışına yerleştirilerek kullanılmıştır. Havanın test bölümü giriş-çıkışındaki sıcaklık ve bağıl nem değerlerini belirlemek için K-tipi ısı çiftleri (T) (Ahlborne K-type) ve nemölçerler (H) (Ahlborne) yerleştirilmiştir. Test bölümü çıkışındaki hava tekrar radyal fan girişine yönlendirilerek kapalı bir çevrim sağlanmıştır.



Şekil 2.1. DeneY sisteminin şematik gösterimi (1.Radyal fan, 2.Frekans konvertörü, 3.İklimlendirme ünitesi, 4.Sirkülasyonlu su banyosu, 5.Nem alma, 6.DC güç kaynağı, 7.Nemlendirme, 8.Nem verme kontrol ünitesi, 9.Şebeke suyu hattı, 10.Sirkülasyonlu su banyosu, 11.Kamera, 12.Akış kanalı)

Deneyslerde boru içerisinde çalışma akışkanı olarak antifriz (Castrol Radicool SF), kanal içerisinde ise hava kullanılmıştır. 1 adet sirkulasyonlu su banyosu (10) esnek hortum ile test bölümüne seri bağlanmıştır. Test sistemine gönderilecek olan sıvı antifriz debisi sirkulasyonlu su banyosu kontrol edilerek ayarlanabilmektedir. Ayrıca, test bölümünün giriş ve çıkışına yerleştirilen K-tipi ışıl çiftler ile antifrizin sıcaklığı ölçülmüştür. Deney düzeneğinde yer alan ışıl çiftler, nem ölçerler, basınc ölçerler ve akışkan debi ölçerler bir veri toplayıcıya uygun konektörler ile bağlanmıştır. Test bölümünde meydana gelen yoğuşma ve karlanma kamera (11) ile gözlemlenmiştir. Sıcaklık, nem, debi ve karlanma kalınlığı ölçümleri bilgisayar kullanılarak kayıt altına alınmıştır.



şekil 2.2. Test bölümü ve karlanma kalınlığı lm

Silindirik boru üzerinde meydana gelen yoğuşma ve karlanma kalınlığının tespiti şekil 2.2 'de gösterilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Test bölümü kamera (1), silindir boru (2), karlanma miktarı (3) ışıl çiftler (4), giriş-çıkış basınc ölçer (5), veri toplayıcı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği envanterinde bulunan kamera (Sony FDR-AX53) boru gövdesine x doğrultusunda, y ekseninde ise uygun görüş açısı ayarlanarak platformuna sabitlenmiştir. Sirkulasyonlu su banyosu ve test bölümü arasındaki bağlantı elemanları ve boru sızdırmazlığını sağlamak için kelepçe ve ışı kaybını önlemek için yalıtım malzemesi kullanılmıştır.

2.1.1. Test Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

2.1.1.1. Veri Toplayıcı

Deneysler esnasında elde edilen veriler Almemo 5690-1 marka ve model numaralı veri toplayıcısı kullanılarak kayıt altına alınmıştır (Resim 2.1). Deney düzeneğinde yer alan ışıl çiftler, nem ölçerler, basınc ölçerler veri toplayıcıya uygun bağlantı elemanları ile bağlanmıştır.



Resim 2.1. Veri toplayıcısı ve ölçüm aletleri bağlantıları

2.1.1.2. Sirkülasyonlu Su Banyosu

Lauda RP855 marka ve model numaralı, 8 litre kapasiteli sirkülasyonlu su banyosu soğutma akışkanını gerekli deney koşullarına getirmek ve sistemde dolaşımını sağlamak için kullanılmıştır (Resim 2.2). Akışkan olarak donma noktası -37°C olan antifriz kullanılmıştır. Böylece test koşullarında boru içerisinden geçen akışkanın donması riski ortadan kalmıştır. Sirkülasyonlu su banyosunun çalışma sıcaklığı -50 ile $+200^{\circ}\text{C}$ arasındadır.



Resim 2.2. Sirkülasyonlu su banyosu

2.1.1.3. Kamera

Yoğuşma ve karlanma kalınlıklarını görüntüleyebilmek amacıyla Sony marka FDR-AX53 model numaralı kamera kullanılmıştır. Kamera 5440 x 3056 piksel çözünürlükte, 1/6 saniye poz süresine sahip fotoğraflar çekmektedir. Kamera Resim 2.3 'te gösterilmiştir.



Resim 2.3. Kamera

2.1.1.4. Isıl Çiftler

Test sisteminde 0,2 mm kalınlığında ve -250 °C ile +205 °C arasında ölçüm aralığı olan Ahlborn marka K-tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Resim 2.4 'de gösterilen uygun bağlantı (ZA 9020-FS) elemanı ile veri toplayıcıya bağlanan ısı çiftleri, sıcaklığa bağlı mikro volt cinsinden oluşan voltaj farkını sıcaklık cinsinden ölçebilmektedir.



Resim 2.4. Ahlborne K-tipi ısı çiftleri

2.1.1.5. Radyal Fan

Havayı koşullandırmak için Euroofan APE 801/B marka ve model numaralı Radyal fan kullanılmıştır. Radyal fan 4 ile 22 m³/dk arasında hava debisi sağlayabilmektedir.



Resim 2.5. Radyal fan

2.1.1.6. Frekans konvertörü

Frekans konvertörü olarak 19 kW gücünde Omron RX serisi fan hızının ayarlanabilmesi amacıyla deneylerde kullanılmıştır.



Resim 2.6. Frekans konvertörü

2.1.1.7. Anemometre

Kanal içerisindeki havanın debisini ölçmek amacıyla Kimo marka LV 107 model numaralı anemometre kullanılmıştır. Cihaz 0,30 ile 35 m/sn ölçüm aralığına sahiptir.



Resim 2.7. Anemometre

2.1.1.8. İklimlendirme Ünitesi

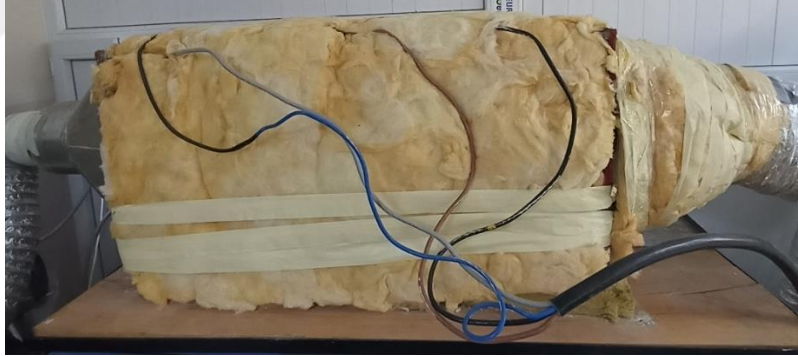
Hava nemini ayarlamak için Resim 2.8 'de verilen Hitit Üniversitesi envanterinde bulunan sirkülasyonlu su banyosu bir ısı değiştirici hattına bağlanarak deneyler esnasında havanın neminin ayarlanması amacıyla kullanılmıştır. Sirkülasyonlu su banyosu 3,3 kW soğutma, 30 litre akışkan kapasitesine sahiptir. Su banyosu -35°C ile +150°C sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Sirkülasyonlu su banyosunda düşük sıcaklıklarda çalışması amacıyla antifriz ve saf su karışım akışkanı kullanılmıştır. Sirkülasyonlu su banyosu sıcaklığı istenilen değere ayarlanarak akışkanın bir ısı değiştiricisinden devir daimi sağlanmıştır. Isı değiştiricisi Şekil 2.1 de gösterildiği gibi uygun pozisyonda hava akış kanalına konumlandırılarak istenilen bağıl nem değerleri sağlanmıştır.



Resim 2.8. Nemlendirme ünitesi

2.1.1.9. Nem Alma Ünitesi

Uygun sıcaklık koşullarını sağlamak ve havanın nemini almak için Resim 2.9 'da verilen Hitit Üniversitesi envanterinde bulunan 5 kW 'lık ünite kullanılmıştır.



Resim 2.9. Nem alma ünitesi

2.1.1.10. Güç Kaynağı

Sıcaklık kontrolünün gerçekleştirilebilmesi amacıyla Autonics marka DigiPower2000 model sıcaklık kontrol güç kaynağı deneylerde kullanılmıştır. Resim 2.10 da bulunan güç kontrol ünitesi Resim 2.9 da bulunan nem alma ünitesine bağlanarak sıcaklık kontrolü sağlanmıştır. Nem alma ünitesinin çıkışına yerleştirilen ısı çift yardımıyla nem alma ünitesi çıkışındaki havanın sıcaklığı ölçülerek güç kaynağından ayarlanan değer sabit tutulmuştur.



Resim 2.10. AC güç kaynağı

2.1.1.9. Nem Verme Ünitesi

İstenilen nemi sağlamak amacıyla Seungil marka OH006-6 model nem verme cihazı deney hattına bağlanarak kullanılmıştır. Cihaz şebeke suyundan ihtiyaç halinde gerekli miktarda suyu çekerek istenilen buhar miktarı test sistemine göndermiştir.



Resim 2.11. Nem verme cihazı

2.1.1.10. Nem Ölçer

Deneyler sırasında havanın bağıl neminin belirlenmesi amacıyla test bölümü girişi ve çıkışına nemölçer sensörler hava akış kanalının merkezinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Havanın bağıl neminin belirlemek için Ahlborn marka FHAD 46-C7 model nemölçerler kullanılmıştır. Nemölçerler uygun bağlantı elemanı ile veri toplayıcıya bağlanmıştır.



Resim 2.12. Nemölçer

2.2. Silindir Boru Geometrisinin Tasarlanması ve İmalatı

Deney sisteminin test bölümünde kullanılmak üzere silindirik bir boru geometrisi tasarlanmıştır. Tasarlanan test numunesi Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Geometrik parametreler ve kinematik parametreler Tablo 2.1’ de verilmiştir. Silindir boru alüminyum T6063 malzemeden imal edilmiştir. Boru boyu (L) 200 mm’dir. Boru iç çapı (d_1) 10 mm’dir. Boru kalınlığı (t_b) 2 mm olarak belirlenmiştir.

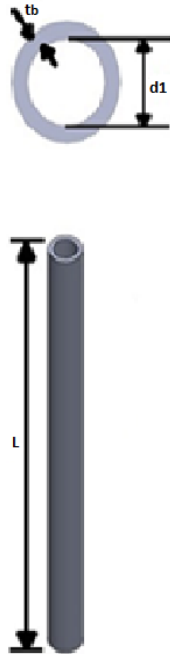
Tablo 2.1. Deneysel çalışma parametreleri

Geometrik Parametreler	Boru Boyu, L_b (mm)	200
	Boru Kalınlığı, t_b (mm)	2
	Boru Dış Çapı, d_2 (mm)	14
	Boru İç Çapı, d_1 (mm)	10
Kinematik Parametreler	Hava Sıcaklığı, T_{hg} (°C)	15
		30
		45
	Hava Bağıl Nem, R_h (%)	30
		45
		60
	Hava Reynolds, Re_d	1426
		1124
		875
		506
300		
Sıvı Debisi, m_s (kg/s)	0,126	
Sıvı Sıcaklığı, T_s (°C)	-30	
Çalışma Zamanı, dk	180	

2.3. Deneysel Yöntem

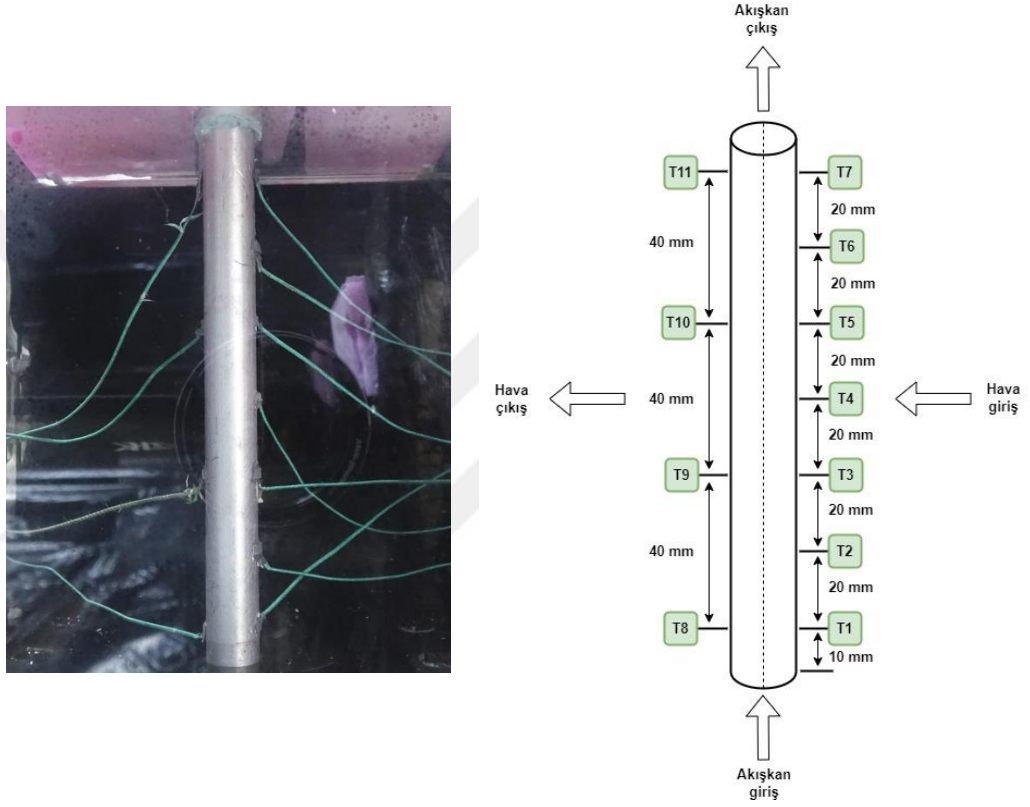
Bu çalışma kapsamında Tablo 2.1' de belirlenen geometrik ve kinematik parametreler için deneyler yapılmıştır. Boru iç çapı (d_1), boru kalınlığı (t_b), boru boyu (L) sabit olan, alüminyum T6063 malzemeden imal edilmiş tek bir boru üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kinematik parametre olarak havanın laminar ve türbülanslı akış için Reynolds sayısı (Re_d), havanın bağıl nemi (R_h), havanın sıcaklığı (T_{hg}) değişken parametreler olarak incelenirken, soğutucu sıvı debisi (m_s), soğutucu sıvı sıcaklığı (T_a) ve sistem çalışma basıncı sabit parametreler olarak incelenmiştir.

İlk olarak deney numunesi boru hava akış kanalına yerleştirilmiş ve sirkülasyonlu su banyosuna şeffaf hortumlar vasıtasıyla bağlanmıştır, sızdırmazlık için çelik kelepçeler kullanılmıştır. Kanal içerisinde hava sıcaklığının dış ortam hava sıcaklığından etkilenmemesi için şeffaf pleksi kanal yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Aynı şekilde soğutucu sıvı borulama hattında yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Böylece soğutucu sıvı hattının yüzeyinin ortam havası teması en az seviyeye indirilerek hattın üzerinde meydana gelebilecek karlanmanın en az seviyede olması amaçlanmıştır. Radyal fan yardımı ile hava, havanın laminar ve türbülanslı akışı için sırasıyla $Re_d = 300, 506, 875, 1124, 1426$ değerlerinde test bölümüne gönderilmiştir. İklimlendirme ünitesi kontrol edilerek devreye alınmıştır. Böylelikle havanın sıcaklığı $T_{hg} = 15, 30, 45$ °C değerlerinde sabit tutulmuştur. Nem alma ünitesi ve nem verme ünitesi devreye alınarak da havanın bağıl nemi sırasıyla %30, 45, 60'a ayarlanmıştır. Daha sonra Sony marka FDR-AX53 model numaralı kamera ile her 5 dk' da bir fotoğraf çekilerek karlanma olayının gelişimi kayıt altına alınmıştır. Ayrıca ilk defa karlanmanın gözlemleneceği ilk 5 dk video ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.3. Deneyin üzerinde gerçekleştirildiği boru

Boru ön (hava giriş) tarafında (Şekil 2.4) 7, boru arka (hava çıkış) tarafında ise 4 olmak üzere toplamda 11 noktadan (Şekil 2.4) sıcaklık değişimleri her bir saniyede bir veri aktaracak şekilde kayıt altına alınmıştır. Boru yüzeyine bulunan ısı çiftlerinin konumları yine Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Ayrıca soğuk akışkan (etilen glikol) sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla birer adet ısı çifti boru giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Hava giriş-çıkış sıcaklığı ve nem değerini belirlemek için hava kanalı merkezine nem ölçer ve ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Veri toplayıcı ve kameradan gelen veriler bir adet bilgisayarda Ahlborn veri kayıt programı ile eş zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Karlanma kalınlıkları ve karlanma yüzey alanları Imagej 1.53t yazılımı kullanılarak görüntü işleme yöntemiyle hesaplanmıştır.



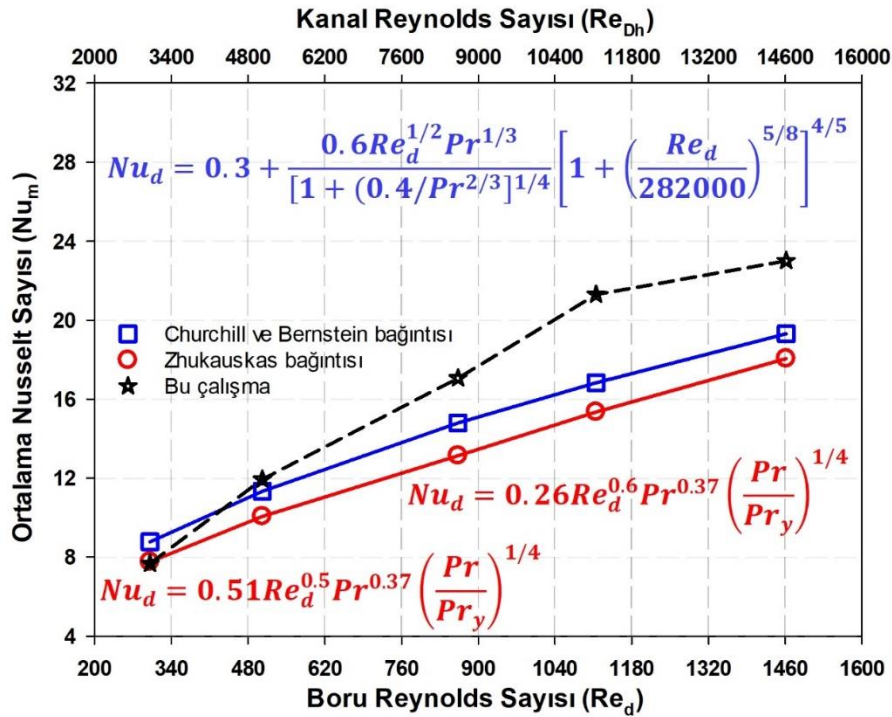
Şekil 2.4. Boru üzerinden alınan sıcaklık ölçümleri

3. BÖLÜM

BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Deneysel Verilerin Doğrulanması

Deneysel sistemi hakkında detaylı bilgi Bölüm 2’ de verilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen buğuların doğruluğu ve kabul edilebilirliğini kanıtlamak için faz değişimsiz (Karlanma olmayan) durum için deneyler yapılarak literatürde verilen bağıntıların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel bulgular için ortalama Nusselt sayısı literatürde verilen ve boru üzerinden akış için kabul görmüş olan bağıntılara göre kıyaslanmıştır. Bu kapsamda Bölüm 2’ de uygulama detayları verilen Zhukauskas bağıntısı ve Churchill-Bernstein bağıntısı kullanılmıştır. Karlanma olmayan akış durumu için elde edilen sonuçların Zhukauskas bağıntısı ile maksimum %27, Churchill-Bernstein bağıntısı ile maksimum %20 hata ile karşılaştığı tespit edilmiştir. Literatürde verilen değerlendirmeler ışığında bu bağıntılar ile $\pm\%20$ hatanın kabul edilebilir değerler olduğu belirtilmiştir (Incropera & DeWitt, 1996).

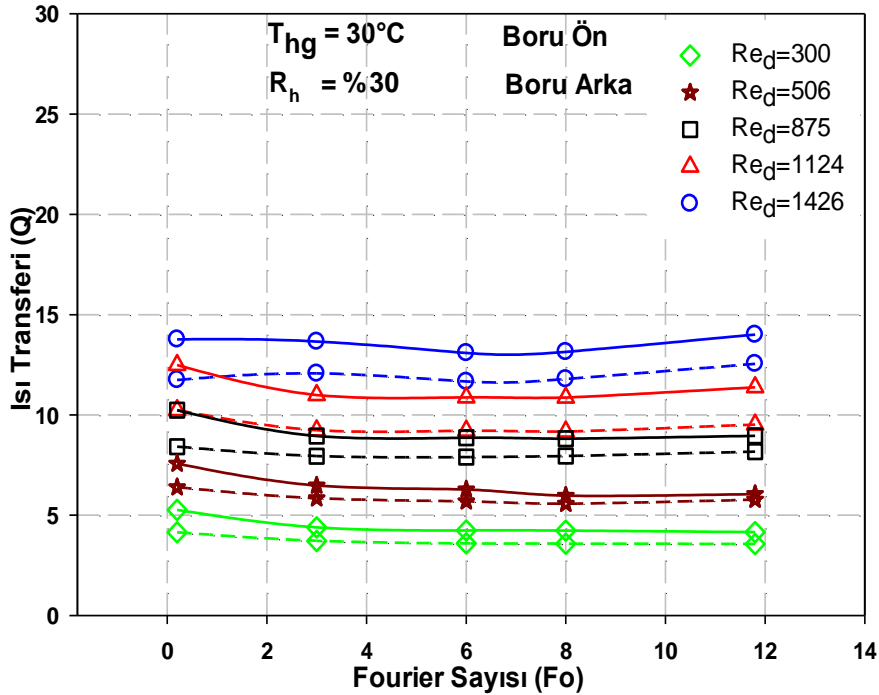


Şekil 3.1. Boru deneysel doğrulama

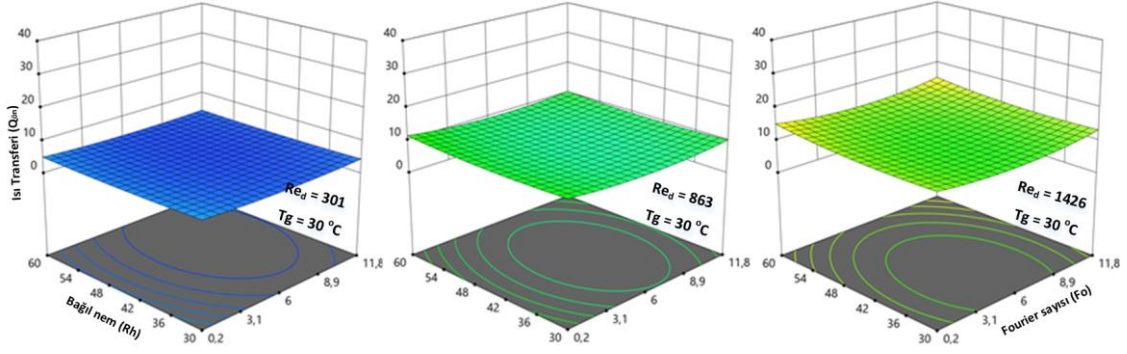
3.2 Bağımsız Parametrelerin Isı Transferine Etkisi

Deneysel bulgulardan elde edilen verilere göre bağımsız parametrelerin tüm değerleri için boru ön ve arka yüzeyinde oluşan ısı transferi zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu durum boru yüzeyinde, zamana bağlı olarak karlanmanın oluşması ve karlanma kalınlığının artması neticesinde meydana gelen ısı transferinin nispeten azalması durumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca tüm ısı transferi deneylerinde görülmüştür ki, ısı transferinin zamana bağlı değişimi lineer olarak değişmemektedir (Şekil 3.2). Hatta boru yüzeyinde meydana gelen ısı transferi karlanma kalınlığı ile paralel bir değişim göstermemektedir. Karlanma kalınlığının yaklaşık lineer arttığı bölgelerde dahi ısı transferi zamana bağlı lineer olarak azalmamaktadır. Bu durum yüzeyde karlanmanın başlamasından sonra karlanmanın etkisiyle yüzeydeki sıcaklığın, karlanma olmamasına göre daha yavaş değişmesinin sonucu olarak görülmektedir. Boru ön yüzeyinde meydana gelen ısı transferi tüm deney şartlarında boru arka yüzeyinde meydana gelen ısı transferinden genelde daha yüksek meydana gelmektedir. Bunun sebebi olarak boru yüzeyinde akış ayrılmalarına bağlı olarak arka basınç alanlarının değişmesi, akış ayrılma noktasından sonra akışkan hızının yerel olarak azalması ve bunun sonucunda ısı taşınımının azalması olarak görülmektedir.

Tek fazlı ısı transferi deneylerinde gözlenen deneysel bulgulara paralel olarak karlanmalı ısı geçişinde de ısı transfer üzerindeki en etkili parametrenin Reynolds sayısı olduğu görülmektedir (Şekil 3.3). Bilindiği gibi Reynolds sayısının artması ile ısı transfer yüzeyinde atalet kuvvetlerinin artması ve dolayısıyla taşınım katsayısının artması bilinen bir durumdur.

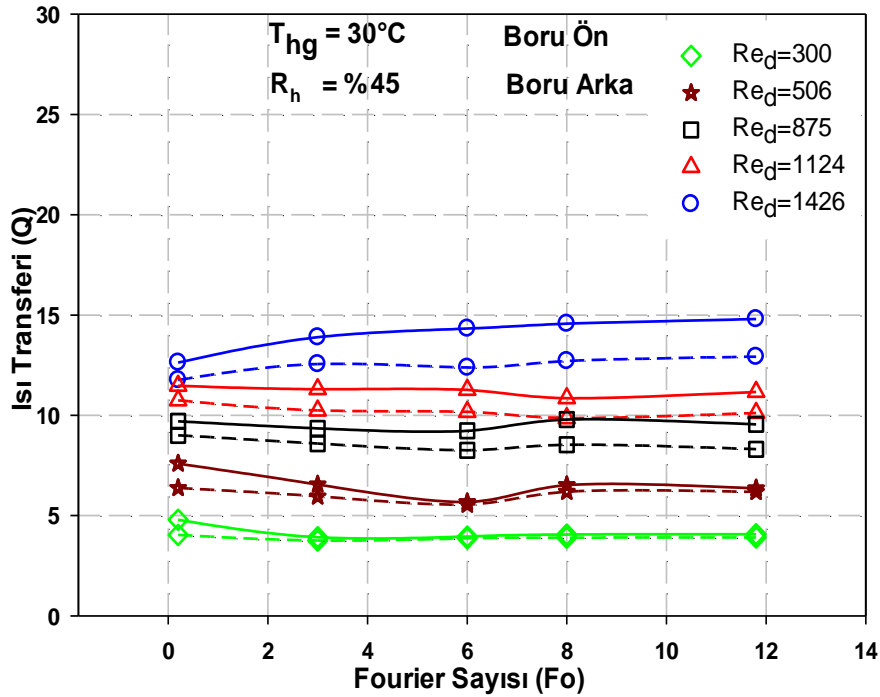


Şekil 3.2. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$ ve $R_h=\%30$ için farklı Reynolds sayılarında ısı transferinin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.3. $T_{hg} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi

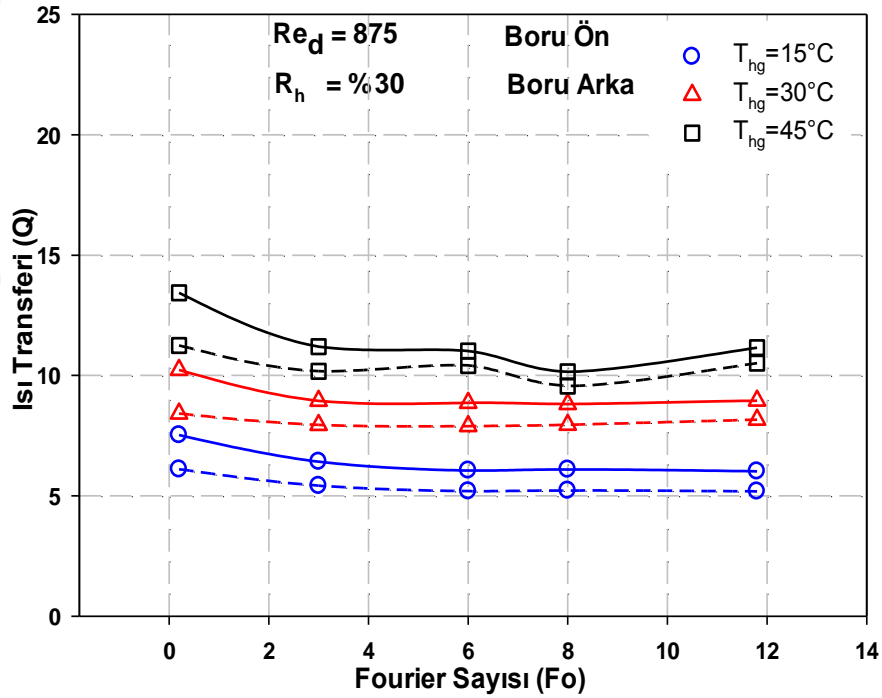
Ele alınan deneysel çalışmada ısı transfer akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Bilindiği gibi hava içerisindeki bağıl nem (R_h) hem ısı transferi hem de karlanma kalınlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bağıl nemin (R_h) artmasıyla boru yüzeyinde meydana gelen ısı transferi (Şekil 3.2’de verilen) $R_h = \%30$ ’a göre nispeten azalmaktadır (Şekil 3.4). Bu durum hava içerisindeki su buharının yoğuşmasının neticesinde ortaya çıkan fiziksel durumun sonucu olarak görülmektedir. Bilindiği gibi sıvı fazdaki su buharlaşırken faz değişimi esnasında ihtiyaç duyduğu gizli ısıyı, bulunduğu ortamdan çekerek karşılama eğilimindedir. Bu fiziksel durumun tam tersinin katılaşmada da gözlenmesi beklenen bir durumdur. Bu durum yüzeydeki ısı transferinin nispeten daha düşük olması ile sonuçlanmaktadır.



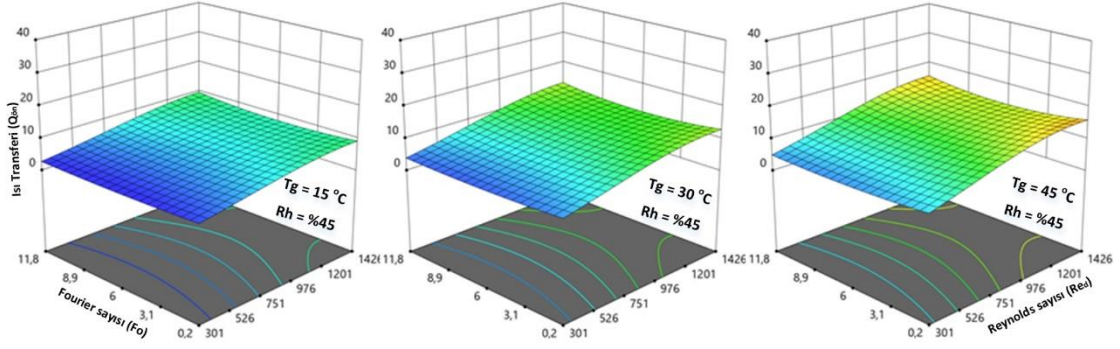
Şekil 3.4. $T_{hg} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $R_h = \%45$ için farklı Reynolds sayılarında ısı transferinin zamana bağlı değişimi

Bağıl nemin (R_h) artmasıyla zamana bağlı ısı geçişi azalsa da bu azalma nispeten çok küçüktür. Ayrıca hava giriş sıcaklığının (T_{hg}) ısı transferi üzerindeki etkisi bağıl nemin (R_h) tüm değerlerinde yaklaşık aynı kalmaktadır. Boyutsuz zaman değerinin (Fourier Sayısı, Fo) artmasıyla ısı transferinin nispeten azaldığı bağıl nemin (R_h) artmasına bağlı olarak bu azalma oranındaki değişimin oldukça düşük olduğu gözlenmektedir.

Ele alınan çalışmada bir diğer bağımsız parametre olarak hava giriş sıcaklığı (T_{hg}) seçilmiştir. Reynolds sayısının ortalama ($Re_d=875$), bağıl nemin (R_h) %30 değerinde hava giriş sıcaklığının ısı transferine etkisi Şekil 3.5 'de verilmiştir. Hava giriş sıcaklığı arttıkça boru ön ve arka yüzeyinde meydana gelen ısı transferi artmaktadır. Bu durum ısı transferinin doğası gereği beklenen bir sonuçtur. Yüzey sıcaklığı ile ısı transfer akışkan sıcaklığı arasındaki farkın artması logaritmik ortalama sıcaklık farkının artmasıyla sonuçlanacaktır. Newton' un soğutma kanunu (19) göz önüne alınırsa bu durum ısı taşınımında dolayısıyla ısı transferinde de bir artışla sonuçlanacaktır.

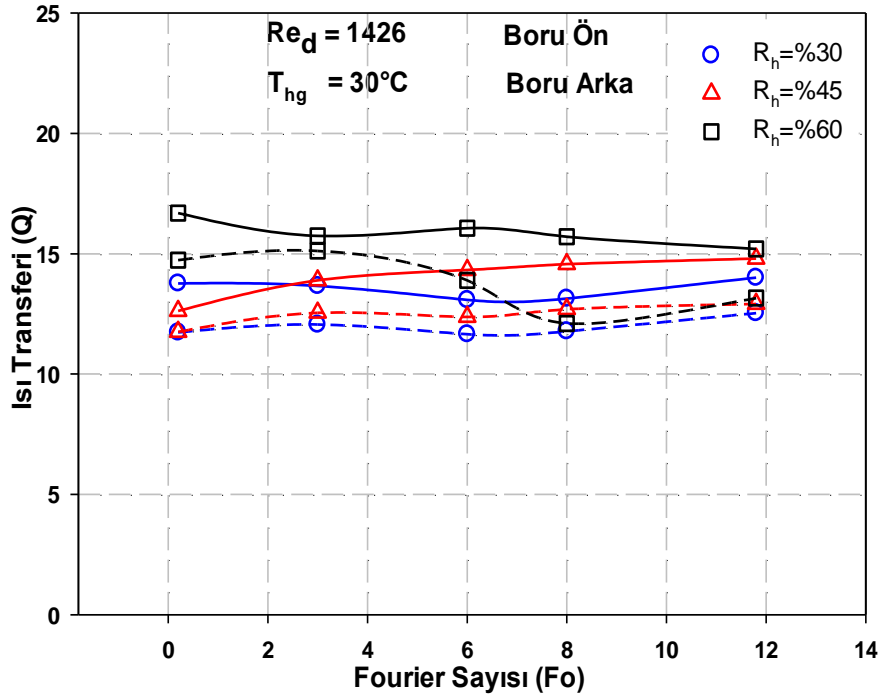


Şekil 3.5. Farklı Reynolds sayıları için ısı transferinin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.6. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi

Hava giriş sıcaklığının artması ile Reynolds sayısının ısı transferi üzerindeki etkisi de değişim göstermektedir. Reynolds sayısının artması ile ısı transferinin artış hızı daha fazla olmaktadır (Şekil 3.6). Bu durum yine Newton' un soğutma kanununda logaritmik ortalama sıcaklık farkıyla birlikte Reynolds sayısına bağlı olarak atalet kuvvetlerinin de artması, akışkan hızının artması ile hem boru ön tarafında hem de arka tarafında ısı taşınım katsayısının nispeten artmasının sonucu olarak görülmektedir.

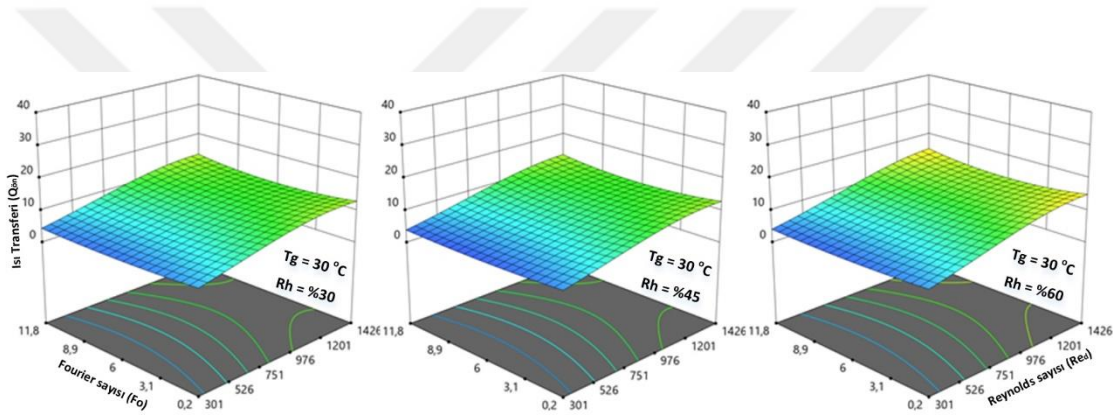


Şekil 3.7. Farklı Reynolds sayıları için ısı transferinin zamana bağlı değişimi

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde boru yüzeyindeki karlanmanın ısı transferine etkisi farklı parametreler için belirlenmiştir. Bu parametreler her ne kadar bağımsız olarak değişse de bu değişimlerin diğer parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisini önemli oranda

değiştirdiği gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda gözlenen bir diğer durum ise yüksek Reynolds sayılarında ve yüksek bağıl nem (R_h) değerlerinde deneysel bulgulardaki sapmanın nispeten daha yüksek olmasıdır. Yapılan tekrarlı deneylerinden de görülmüştür ki yüksek Reynolds sayısı ve yüksek bağıl nem (R_h) değerlerinde tekrarlanabilirlik ve standart sapma nispeten daha yüksektir. Bu durum hava giriş sıcaklığı için gözlenmemiştir.

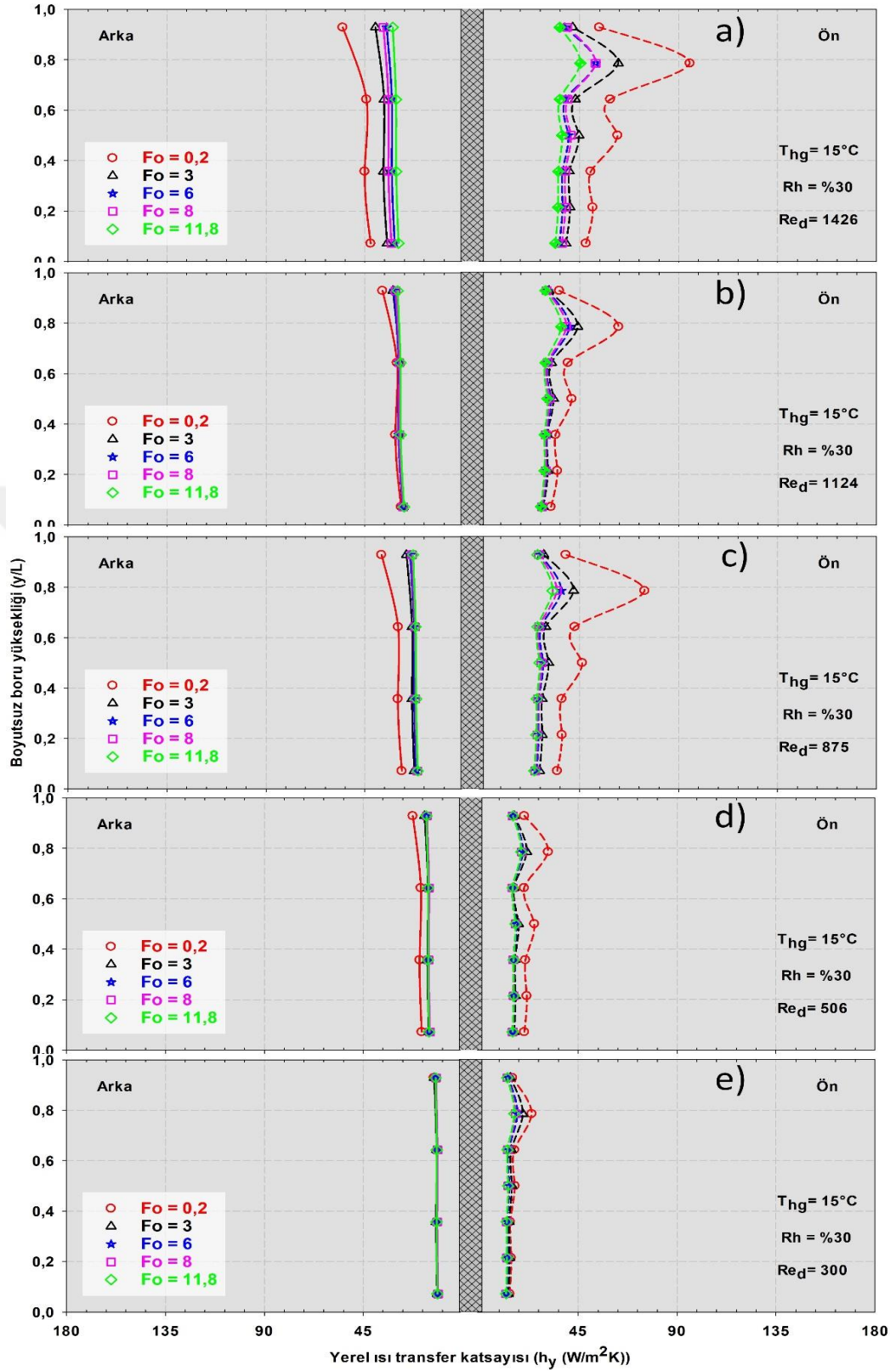
Bağıl nemin (R_h) artması özellikle boru ön ve arka yüzeyinde oluşan ısı transfer farkının artmasının nispeten daha yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır (Şekil 3.7). Bunun sebebi olarak boru ön ve arka yüzeylerindeki atalet kuvvetlerinin etkisi olarak görülmektedir. Bağıl nemin (R_h) artması atalet kuvvetlerini nispeten arttırmaktadır. Atalet kuvvetlerinin artması ayrıca akış ayrılma noktasını da etkilemektedir. Bu durumun neticesinde boru arkasındaki taşınım ön tarafa göre nispeten daha düşük olmaktadır. Böylece boru ön ve arkasındaki ısı transfer farkının da arttığı gözlenmektedir.



Şekil 3.8. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$ için bağımsız parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi

Fo sayısının ısı transferi üzerindeki etkisi yaklaşık 3 saatlik periyotta ortalama 1,3 – 1,5 kat arasında olmaktadır. Buna karşın Reynolds sayısının etkisi 3,5 kata kadar meydana gelmektedir. Hava giriş sıcaklığının 30°C olması durumunda $R_h = \%30$ değerinde Reynolds sayısına bağlı olarak boru ön yüzeyindeki ısı transferi yaklaşık 3 kat artarken $Re_d = 1426$ değerinde bu 3,5 kata kadar çıkmaktadır (Şekil 3.8).

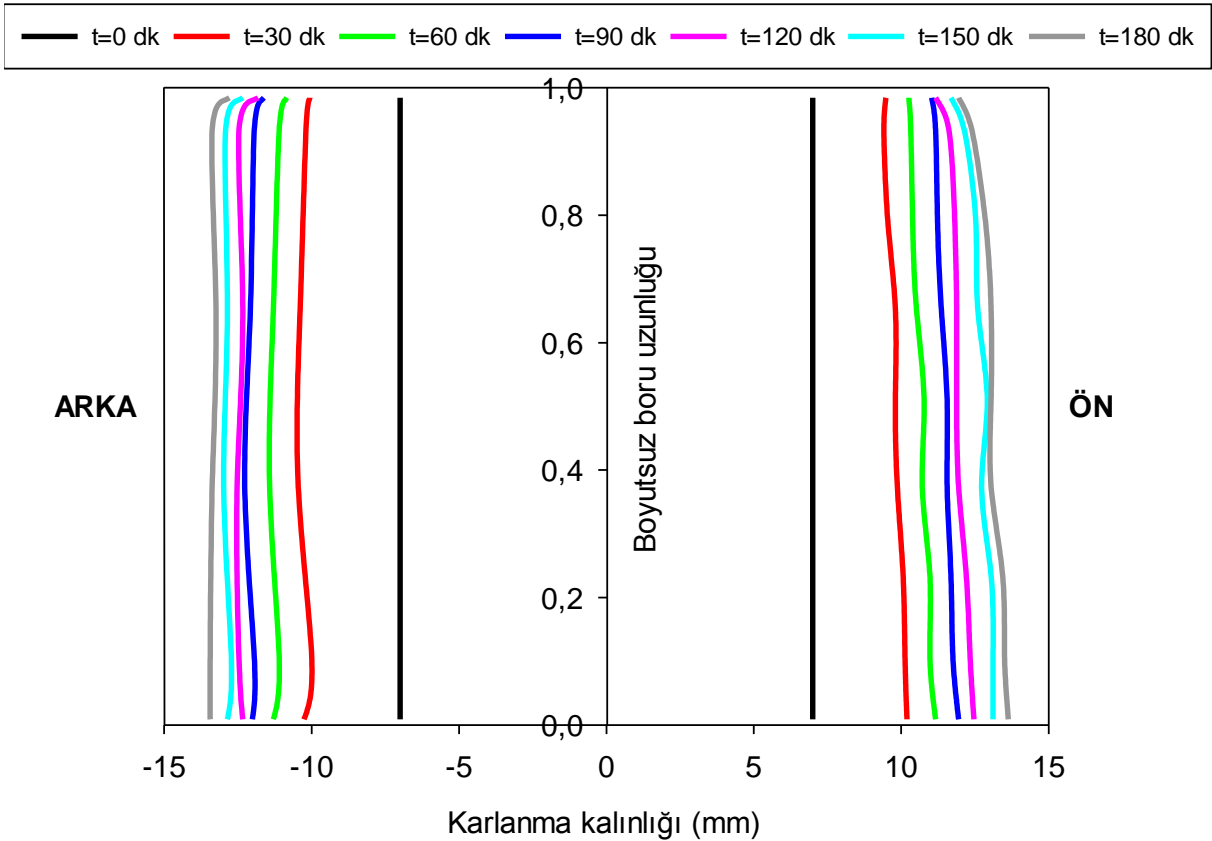
Şekil 3.9(a) 'da boru ön ve arkasında yerel ısı taşınım katsayısının (h_y) boru yüksekliği boyunca değişimi verilmektedir. Burada, $Fo = 0,2$ değeri yaklaşık 3. dakikayı göstermektedir. $Fo = 3, 45, 60, 90$ dakikaya, $Fo = 8, 120$ dakikaya ve $Fo = 11,8$ ise 175. dakikaya denk gelmektedir. Boru içerisinde antifriz akmaktadır. Antifriz borunun altından girmekte ve üstünden çıkmaktadır. $Fo = 0,2$ için yerel ısı taşınım katsayısı hem boru arkasında hem de önünde nispeten daha yüksek olmaktadır. Bunun sebebi olarak Fo sayısının küçük değerlerinde karlanma kalınlığının nispeten daha düşük, buna bağlı olarak borunun çektiği ısı daha yüksek olmaktadır. Boru girişinde (boru alt tarafında) yerel taşınım katsayısı nispeten daha düşük olmakta borunun yukarısına doğru artmaktadır.



Şekil 3.9. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$ ve $R_h=\%30$ için bağımsız parametrelerin yerel ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Bu durum için gözlem yapıldığında boru alt tarafında karlanmanın daha önce başladığı ve zamanla kalınlığının nispeten daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 3.10). Bu duruma bağlı olarak boru alt tarafında yerel ısı transferinin daha düşük boru yüksekliği ile artarak daha yüksek değere sahip olması ile sonuçlanmaktadır. Boru en üst noktasında yerel taşınım katsayısında azalma gözlenmektedir. Bu durum kanal yüzeyi sıcaklığının ve kanal içerisinde oluşan hız dağılımına bağlı olarak yerel hız değerinin nispeten daha düşük olmasının sonucu olarak görülmektedir.

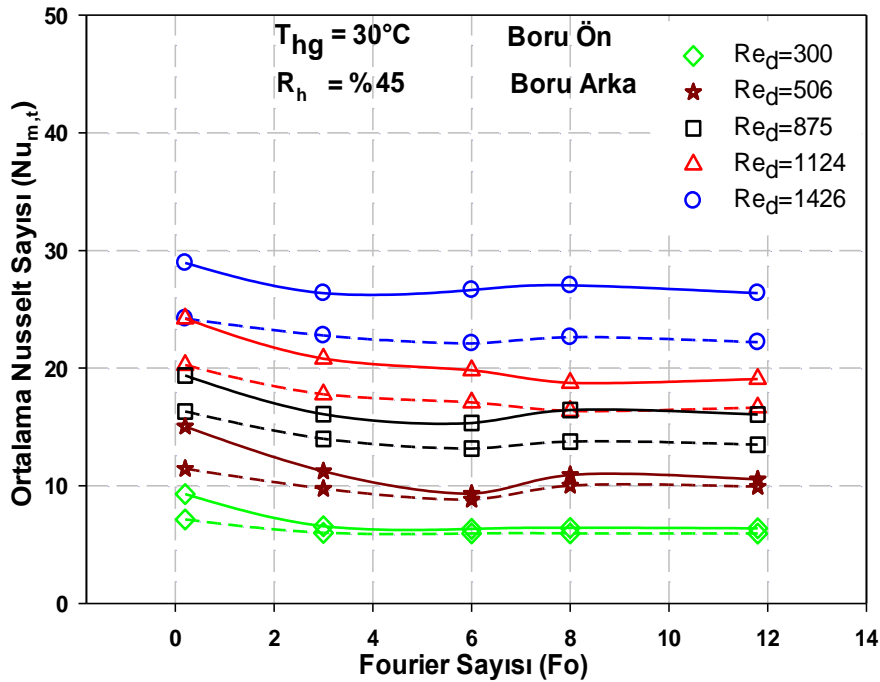
Yerel ısı taşınım katsayısı $Fo = 0,2$ değerinde, boru alt tarafında yaklaşık $44 \text{ W/m}^2\text{K}$ (arka) ve $46 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ön) olarak görülmektedir (Şekil 3.9 (a)). Boru yüksekliğinde yerel taşınım katsayısı boru ön tarafında $92 \text{ W/m}^2\text{K}$ boru arka tarafında ise $52 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerine çıktığı görülmektedir. Zaman adımının ilerlemesi ile yerel taşınım katsayısının nispeten azaldığı ve $Fo = 11,8$ 'de boru ön tarafında ortalama $37 \text{ W/m}^2\text{K}$, arka tarafında ise $29 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğu görülmektedir. Bu değerlendirme ışığında ($Re = 1426$, $T_{hg} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $R_h = \%30$ için) yaklaşık 3 saatlik zaman boyunca yerel ısı transferinin ön tarafta $\%31$, boru arka tarafında ise $\%33$ azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.10. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Re_d=1426$ ve $R_h=\%60$ Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

yerel ısı taşınımındaki azalma nispeten daha fazladır. Re_d değerinin 875 'e düşmesi durumunda (Şekil 3.9 (c)) boyutsuz zamanın (Fo) yerel ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin nispeten yüksek olduğu, zaman adımının ilerlemesi ile özellikle boru arka tarafında yerel ısı taşınım katsayısı üzerinde zamanın etkisinin azaldığı görülmektedir. Buna karşın boru ön yüzeyinde boyutsuz zamanın yerel ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisinin devam ettiği gözlenmektedir. Bu durum iki fiziksel olayın sonucu olarak değerlendirilmektedir;

Bunlardan birincisi atalet kuvvetlerinin kütle difüzyon katsayısı üzerindeki etkisi olarak görülmektedir. Boru ön tarafında atalet kuvvetlerinin etkisi ile sıcak hava içerisindeki su buharının yüzeyde difüzyonunun daha fazla olduğu değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme boru ön yüzeyinde buzlanmanın başlamasına karşın arka yüzeyinde karlanmanın devam etmesinin gözleminin sonucuna göre yapılmaktadır. Ayrıca bu değerlendirme, özellikle düşük Re_d sayılarında (Şekil 3.9 (d) ve (e)) ön tarafta belirlenen yerel taşınım katsayılarında da boyutsuz zamanın (Fo) etkisinin azalması sonucu ile desteklenmektedir.

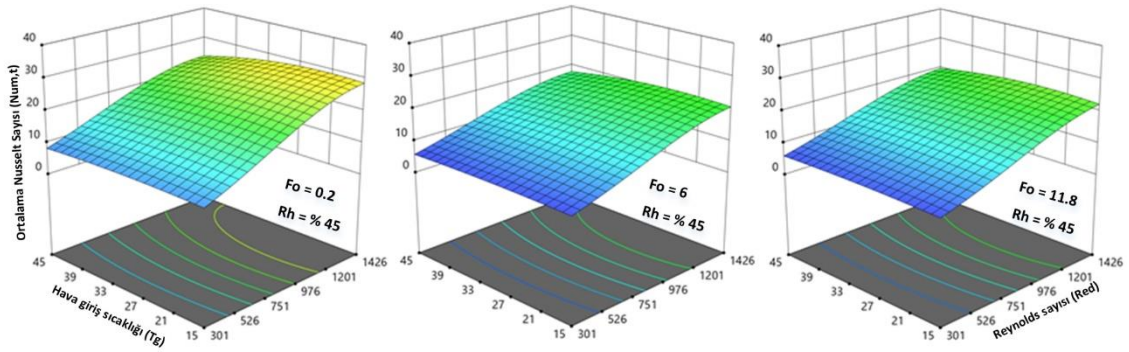


Şekil 3.11. $T_{hg}=30^{\circ}C$ ve $R_h=\%60$ ' da farklı Reynolds sayılarında $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

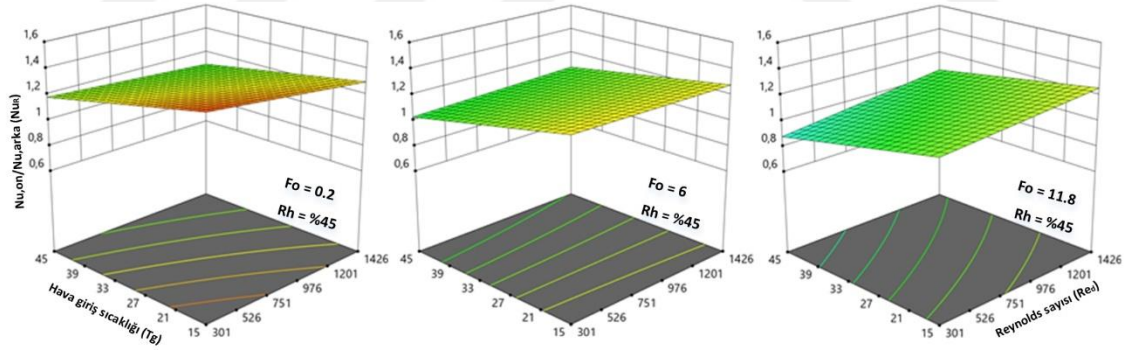
Hava giriş sıcaklığı ısı taşınım katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hava giriş sıcaklığının artması yüzey ve akışkan ortamdaki sıcaklık farkını, dolayısıyla ısı taşınım katsayısını artırmaktadır (Şekil 3.11) Bununla birlikte hava giriş sıcaklığının artması boru ön ve arka tarafındaki ısı taşınım katsayısı arasındaki farkı da azaltmaktadır. Bununla birlikte

bağlı nemin ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi özellikle boyutsuz zamanın (Fo) düşük değerlerinde fazla olmaktadır (Şekil 3.12).

Mühendislik uygulamalarında ısı transferinin ölçümü Nusselt sayısı ile verilir. Nusselt sayısı yüzeydeki sıcaklık gradyanıdır ve yüzeydeki akışkanın iletim yolu ile olan ısı transferinin taşınım ile olan ısı transferine oranı olarak tanımlanır. Deneysel çalışmada yüzey sıcaklıkları boru ön tarafında 7 noktada ölçülmüştür. Bu noktalardan ölçülen sıcaklık değerlerine bağlı olarak yerel taşınım katsayısı ve dolayısıyla yerel Nusselt sayısı belirlenmiştir. Her bir boyutsuz zaman adımı için yerel Nusselt sayılarından o zaman adımı için ortalama Nusselt sayısı tespit edilmiştir (Şekil 3.13).

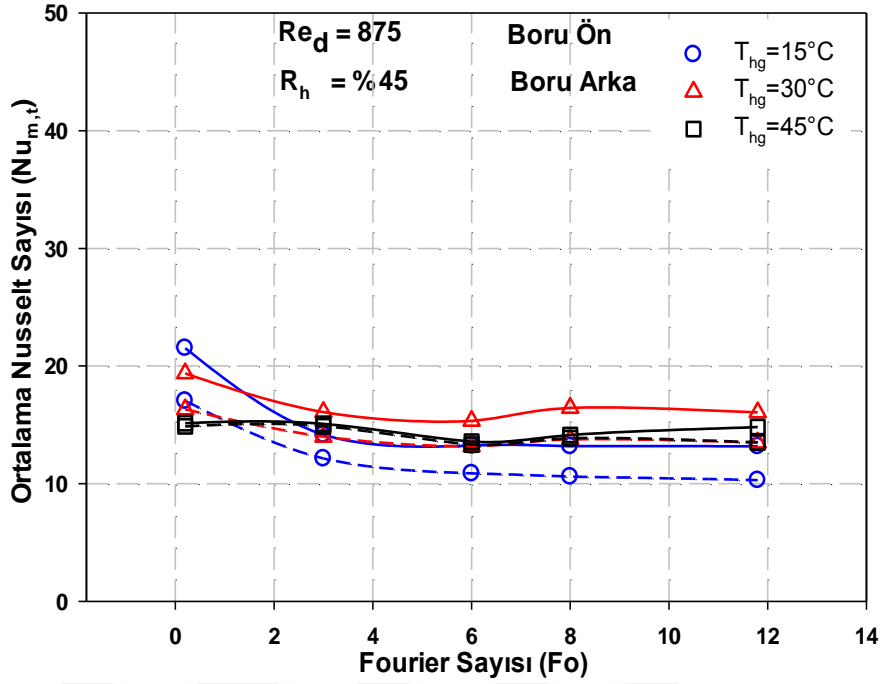


Şekil 3.12. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi



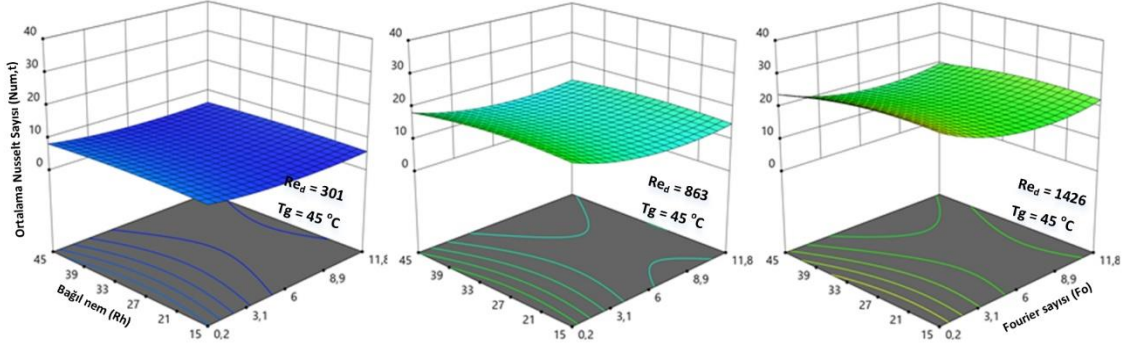
Şekil 3.13. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi

$T_{hg} = 15^\circ\text{C}$ ve $R_h = \%45$ için ortalama Nusselt sayısı ($Nu_{m,t}$) boyutsuz zamana bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu durumun muhtemel nedeni yukarıda detaylı olarak tartışılmıştır. Boyutsuz zaman arttıkça $Nu_{m,t}$ değeri nispeten azalmaktadır. Bununla birlikte Re_d sayısının $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Bunlara ek olarak Şekil 3.14 de görüldüğü gibi düşük Re_d değerlerinde T_{hg} 'nin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi gözlenmezken yüksek Re_d değerlerinde bu etki %20' lere kadar artmaktadır. Bu durum atalet kuvvetlerine ve sıcaklık farkına bağlı olarak ısı taşınım katsayısını daha fazla etkilediğinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

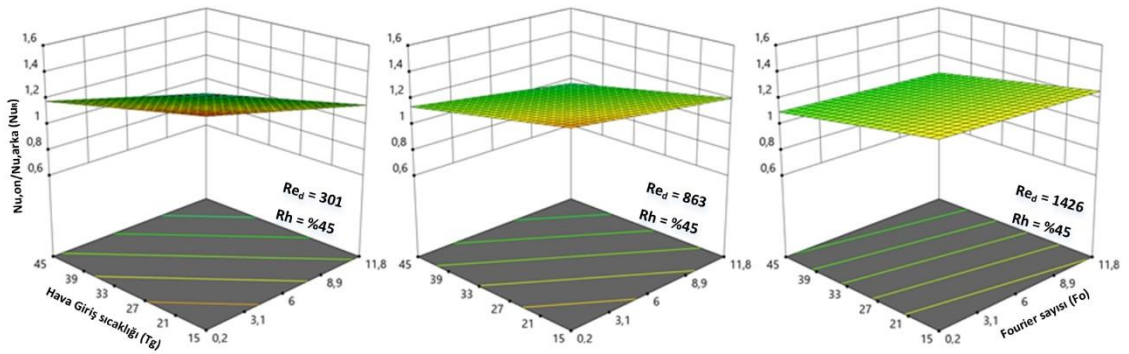


Şekil 3.14. $Re_d = 875$, $R_h = \%45$ ve farklı T_{hg} ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

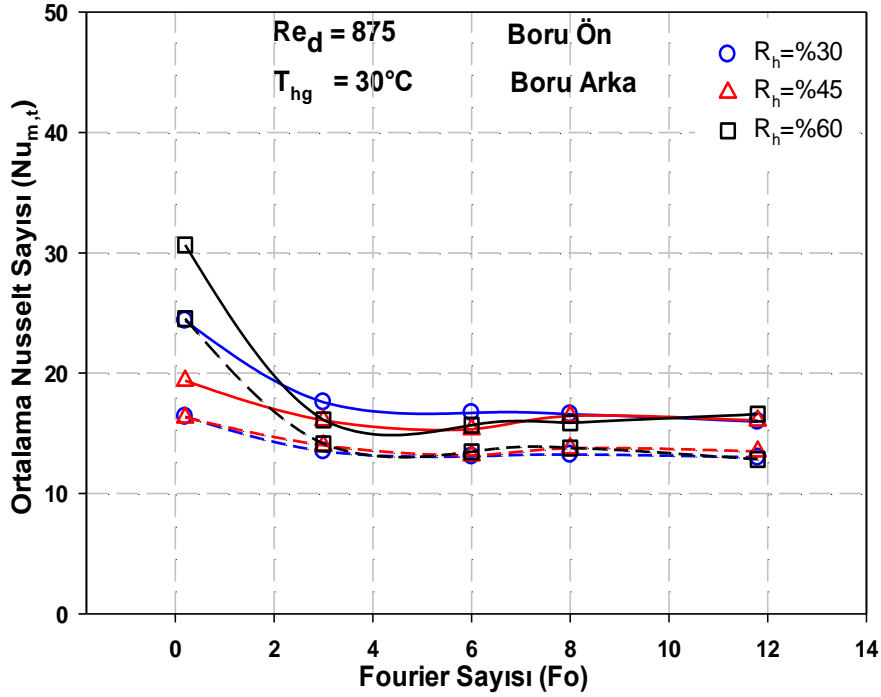
Şekil 3.15 'de $R_h = \%45$ 'de boyutsuz parametrelerin boru ön ve arka tarafındaki ısı transfer oranları ($Nu_R = Nu_{m,ön} / Nu_{m,arka}$) üzerindeki etkisi verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük hava giriş sıcaklığı ($T_{hg} = 15^\circ\text{C}$) ve yüksek Reynolds sayısı ($Re_d = 1426$) değerinde ön tarafta elde edilen ısı transferinin tam arka tarafta oluşan ısı transferine oranı tüm boyutsuz zamanlarda (Fo) yaklaşık aynı ve $Nu_R \cong 1,3$ olmaktadır. Bununla birlikte Şekil 3.15 'de ilginç bazı sonuçlarda göze çarpmaktadır. Buna göre, düşük boyutsuz zamanlarda $Fo = 0,2$ düşük giriş sıcaklığı ($T_{hg} = 15^\circ\text{C}$) ve düşük Reynolds sayısı ($Re_d = 300$) değerlerinde Nu_R maksimum olmaktadır. Ayrıca $Fo = 0,2$ ve $Fo = 6$ değeri için Nu_R daima 1 'den büyük olmaktadır. Bununla birlikte $Fo = 11,8$ olduğunda yüksek giriş sıcaklığı ($T_{hg} = 45^\circ\text{C}$) ve düşük Reynolds sayılarında ($Re_d = 300$) boru arkasında oluşan ısı transferi ön tarafında oluşan ısı transferini bir miktar geçmektedir ($Nu_R < 1$). Bu durum özel bir fiziksel olayın sonucu olarak değerlendirilmektedir. $Fo = 11,8$ 'de boru ön tarafında karlanma bölgesinde buzlanmanın oluşumu büyük oranda tamamlanmış olmaktadır. Buna karşın arka yüzeyde karlanma etkili görülmektedir.



Şekil 3.15. $T_{hg} = 45^\circ\text{C}$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi

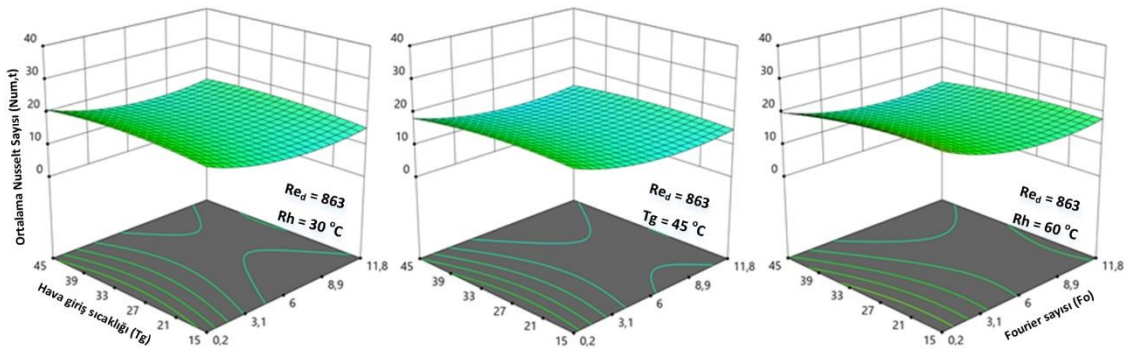


Şekil 3.16. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi

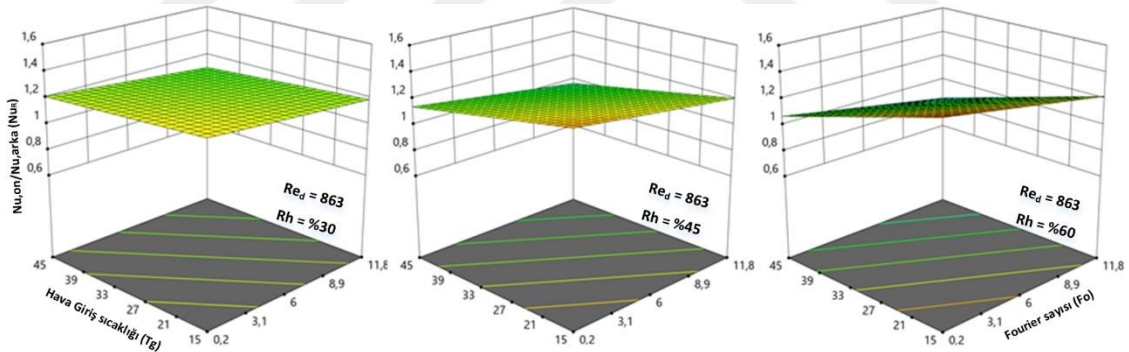


Şekil 3.17. $Re_d = 875$, $T_{hg} = 30^\circ\text{C}$ ve farklı R_h ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

Hava giriş sıcaklığının $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi ayrıca Şekil 3.16 'de verilmektedir. $T_{hg} = 45^\circ\text{C}$ için Re_d değerinin artması $Nu_{m,t}$ değerini belirgin olarak arttırmaktadır (Şekil 3.17). Burada Re_d 'nin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi yok denecek kadar küçük iken $Re_d = 1426$ ve $Fo = 11,8$ değerlerinde bir miktar arttığı görülmektedir. Ayrıca Re_d değeri arttıkça hava sıcaklığının Nu_R üzerindeki etkisi nispeten azalmaktadır (Şekil 3.18). Bu durum boyutsuz zaman (Fo) için de geçerlidir. Bunun sebebi, karlanma kalınlığının düşük değerlerinde ($Fo = 0,2$) düşük sıcaklık farklarında ısı transferinin yüksek olması olarak görülmektedir.



Şekil 3.18. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi



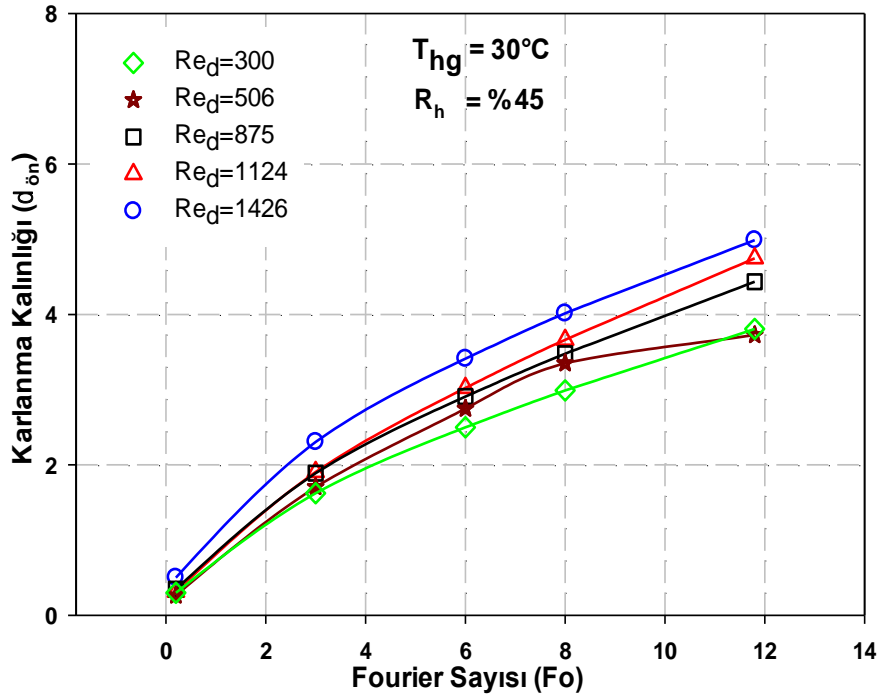
Şekil 3.19. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin Nu_R üzerindeki etkisi

Şekil 3.19 'de $Re_d = 863$, $T_{hg} = 30^\circ\text{C}$ için $Nu_{m,t}$ değerinin Fo sayısına göre değişimi verilmektedir. R_h 'nin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisi detaylandırılmıştır. Görüldüğü gibi başlangıçta R_h 'nin değerlerine göre $Nu_{m,t}$ değeri değişim göstermektedir. Boyutsuz zaman adımının ilerlemesi ile $Nu_{m,t}$ değeri yaklaşık eksponansiyel olarak azalmakta ve boru önu için $Fo = 8$ değerinde, boru arkası için $Fo = 4$ değerinde asimptotik olmaktadır. Bu değişim R_h 'nin $Nu_{m,t}$ üzerindeki etkisine de açıklık getirmektedir. Burada R_h 'nin ve Nu_R değerinin daha genel değerlendirilmesi verilmektedir. Görüldüğü gibi R_h 'nin %30 değeri için Nu_R değeri 1,14 ve 1,2 oranında değişmektedir. T_{hg} 'nin düşük değerinde Fo 'nun Nu_R üzerindeki etkisi yok denecek kadar küçüktür. Ayrıca $Fo = 0,2$ 'de T_{hg} 'nin Nu_R üzerindeki etkisi çok düşüktür. Ancak, $Fo = 1,8$ 'de T_{hg}

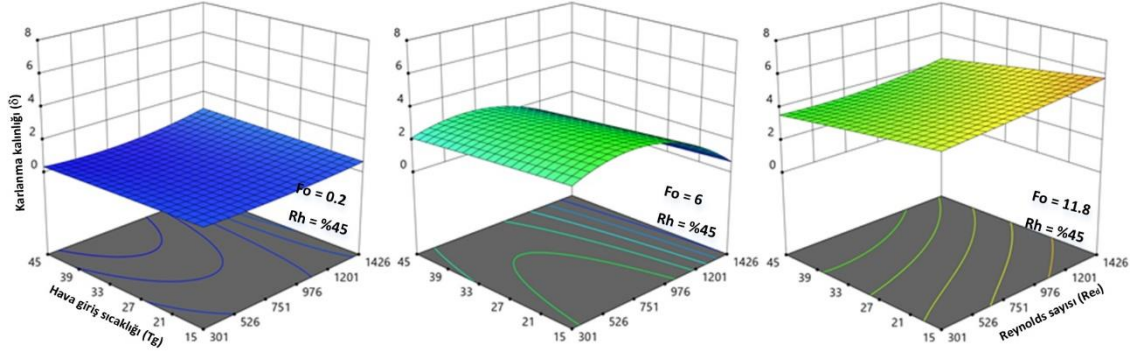
artıkça Nu_R değeri azalmaktadır. Bu değişim R_h' nin tüm değerlerinde gözlenmektedir. Buna karşın $R_h = \%45$ olunca bu değişimin R_h' nin $\%30$ değerine göre R_h' nin $\%60$ olunca bu değişimlere göre daha fazladır. Bunun sebebi olarak; bir önceki değerlendirmelerde de belirtildiği gibi hava atalet kuvvetleri ve difüzyon değeri görülmektedir.

3.3. Bağımsız Parametrelerin Karlanma Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Ele alınan bu çalışmada, silindirik bir boruda karlanmanın ısı transferine etkisinin deneysel incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen deneysel bulgularda Re_d' nin artması ile karlanma kalınlığının arttığı (Şekil 3.20) karlanma kalınlığı ile transfer edilen ısı miktarı arasında ters orantı olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular literatürde yapılan benzer çalışmalar ile de benzerlikler göstermektedir. Re_d' nin artmasının akışkan debisinin artması ile doğru orantılı olduğu için birim zamanda geçen akışkan miktarı ile yüzeyde yoğuşma ve karlanma miktarının artması beklenen bir sonuçtur. Bu durum hem Re_d' nin hem de Fo' nun karlanma kalınlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 3.21).

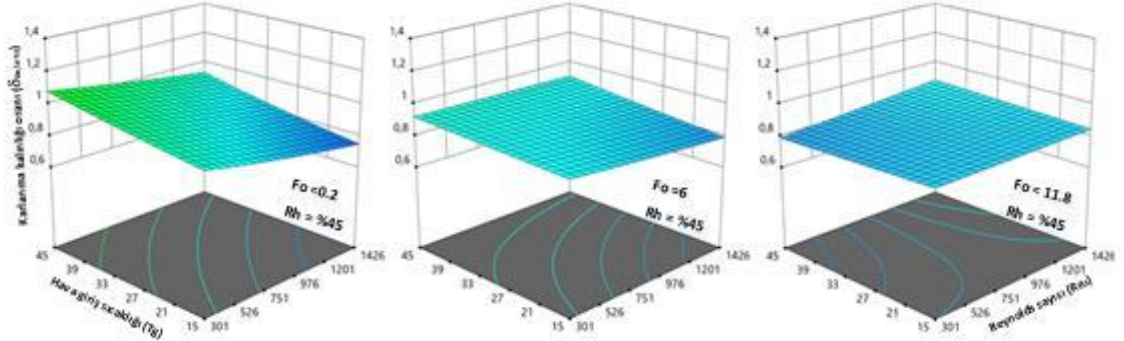


Şekil 3.20. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$ ve farklı Reynolds sayılarında karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

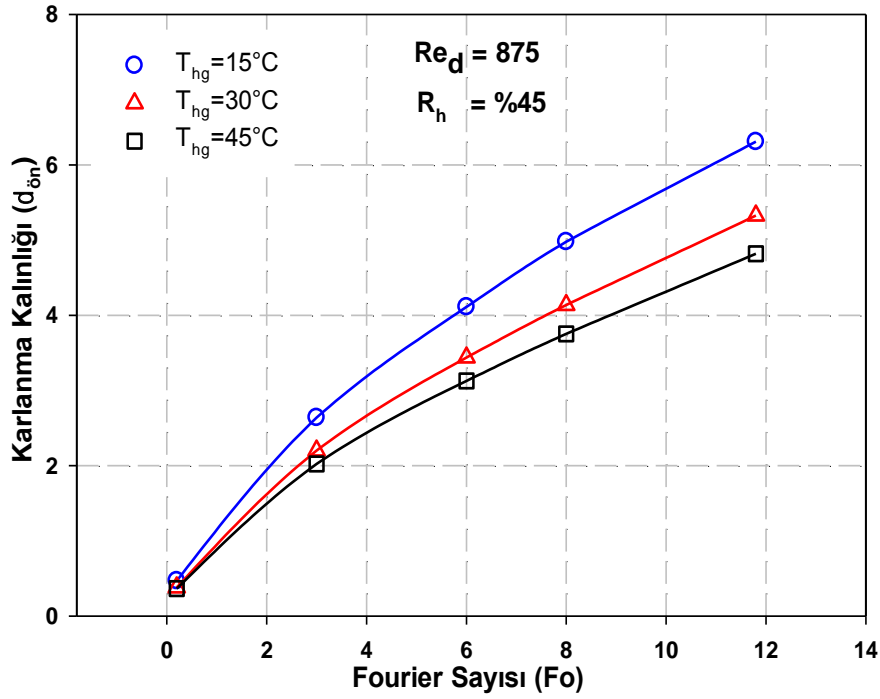


Şekil 3.21. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı üzerindeki etkisi

Elde edilen bulgulardan görülmektedir ki; $Fo = 11,8'$ de Re_d değerinin artması hava giriş sıcaklığının karlanma kalınlığı üzerindeki etkisini de artırmaktadır. Ancak T_{hg} ile karlanma arasında ters orantı vardır. T_{hg} azaldıkça δ ' nin arttığı görülmektedir. Bu durum Şekil 3.22 'de daha açık olarak gözlenebilmektedir. $T_{hg} = 15^\circ\text{C}$, $R_h = \%60$ ve $Fo = 11,8$ değerinde karlanma kalınlığı 6 mm 'ye kadar çıkmaktadır. Aynı değerlerde $R_h = \%30$ olduğunda karlanma kalınlığı yaklaşık % 30 oranda azalarak 4,2 mm 'ye kadar düşmektedir (Şekil 3.23). 1 atm basınçta ve 15°C de havanın doyma basıncı 16,5 mbar, doyma sıcaklığı ise 100°C ' dir.

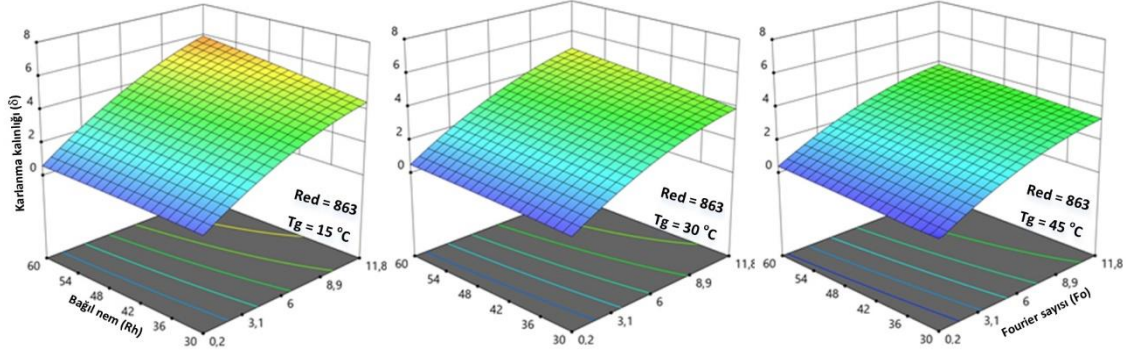


Şekil 3.22. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi

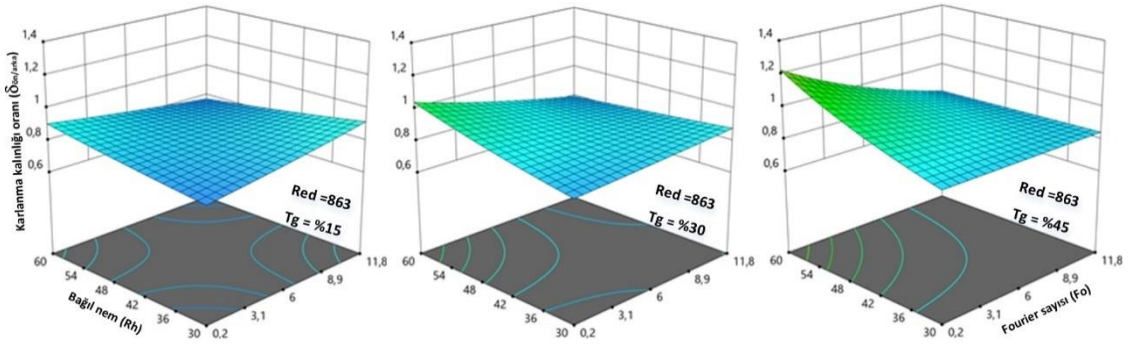


Şekil 3.23. $Re_d=875$, $R_h=\%45$ ve farklı T_{hg} ' lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

Hava giriş sıcaklığının azalması hava içerisindeki su buharının doyma sıcaklığına nispeten yüksek sıcaklığa göre daha erken ulaşacağı ve faz değişiminin başlayacağı beklenen bir sonuçtur. Ancak bu durumun karlanmanın ve karlanma kalınlığının değişiminin üzerindeki etkisi bu çalışma ile detaylı olarak irdelenmektedir. Boru ön ve arka tarafında oluşan karlanma kalınlığı ile T_{hg} arasındaki ilişki ilginç sonuçlar içermektedir. Şöyle ki; T_{hg} ' nin düşük değerlerinde boru arkasında oluşan karlanma boru önüne göre daha fazla olmaktadır ($\delta_{ön} / \delta_{arka} < 1$). Ayrıca $Fo = 11,8$ ve $R_h = \%60$ değerinde bu oran maksimum olmaktadır (Şekil 3.24). R_h azaldıkça $\delta_{ön/arka}$ küçük oranda artmaktadır. Ancak $Fo = 0,2$ 'de bunun tam tersi gözlenmektedir. Bu durum düşük T_{hg} değerinde boru önünde karlanma ve buzlanmanın yaklaşık eş zamanlı olduğu, arka tarafında ise atalet kuvvetlerinin zayıf olmasından dolayı karlanmanın daha etkin olduğu şeklinde değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeyi destekleyici sonuç yine Şekil 3.24' de görülebilmektedir. $T_{hg} = 45$ °C olduğunda $\delta_{önk/arka} > 1$ olmaktadır. Bunun sebebi olarak boru ön yüzeyinde nispeten yüksek hava sıcaklığından dolayı buzlanmanın daha geç oluşması ve karlanmanın daha hızlı yükselmesi olarak görülmektedir.

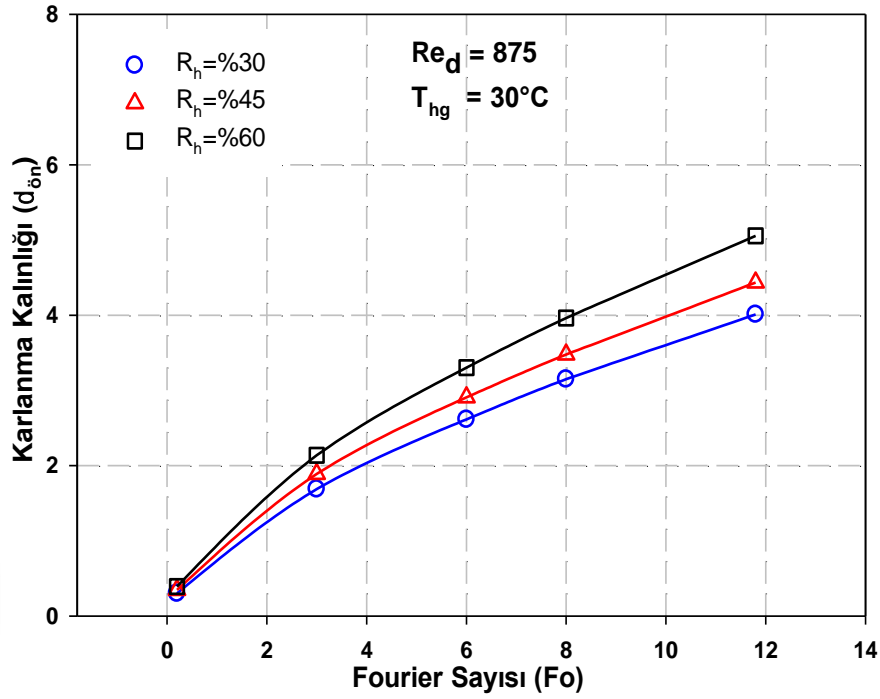


Şekil 3.24. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı üzerindeki etkisi

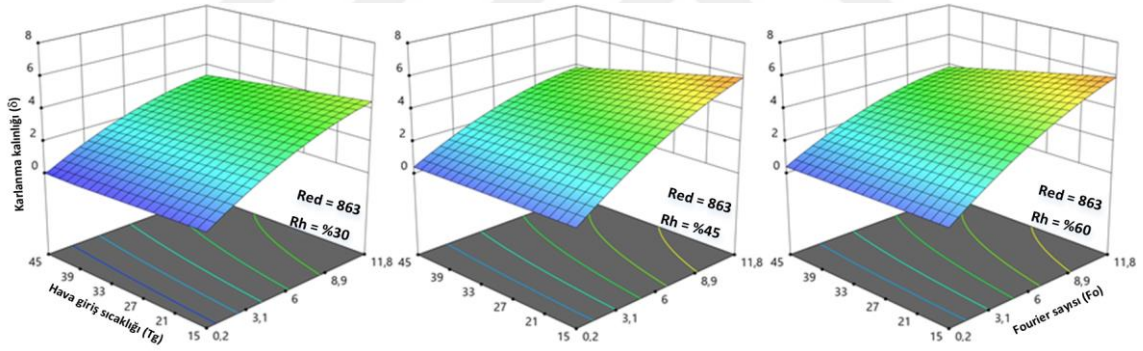


Şekil 3.25. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi

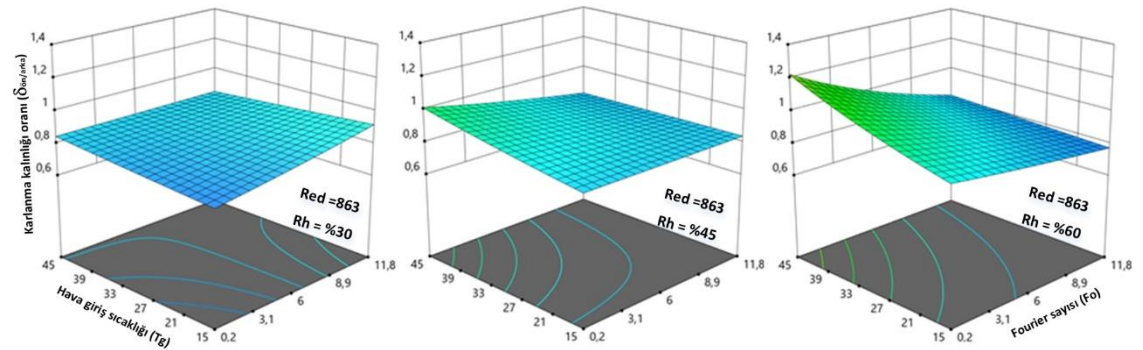
Karlanma kalınlığı üzerindeki en önemli parametrelerden biri de R_h değeridir. R_h ile karlanma kalınlığı arasında doğru orantı vardır (Şekil 3.25). Bununla birlikte R_h ' nin %100 artması $T_{hg} = 15^\circ\text{C}$ 'de karlanma kalınlığında %30 artış ile sonuçlanmaktadır (Şekil 3.26). Bu durum $Fo = 11,8$ 'de gözlenmektedir. Aynı şartlarda R_h %30 değerinde karlanma kalınlığı $T_{hg} = 45^\circ\text{C}$ 'de 3,6 mm, $T_{hg} = 15^\circ\text{C}$ 'de 4,2 mm olmaktadır. Buradan R_h ' nin artması T_{hg} ' nin karlanma kalınlığı üzerindeki etkisinin de artırdığını göstermektedir. Karlanma kalınlığı oranının R_h ' a göre değişimi Şekil 3.27 'de verilmektedir.



Şekil 3.26. $Re_d=875$, $T_{hg}=30^\circ\text{C}$ ve farklı R_h ' lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

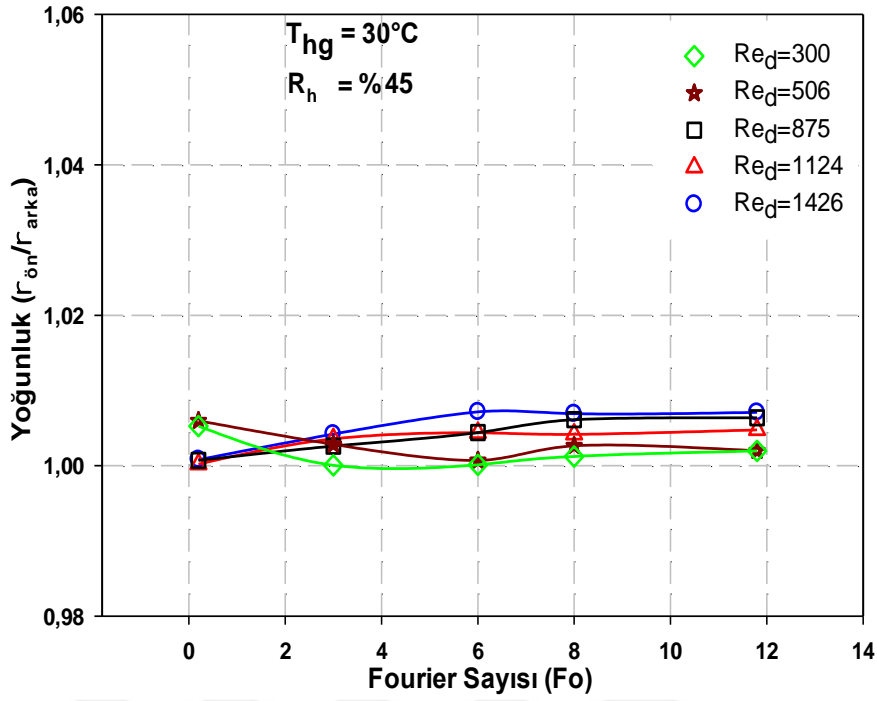


Şekil 3.27. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi

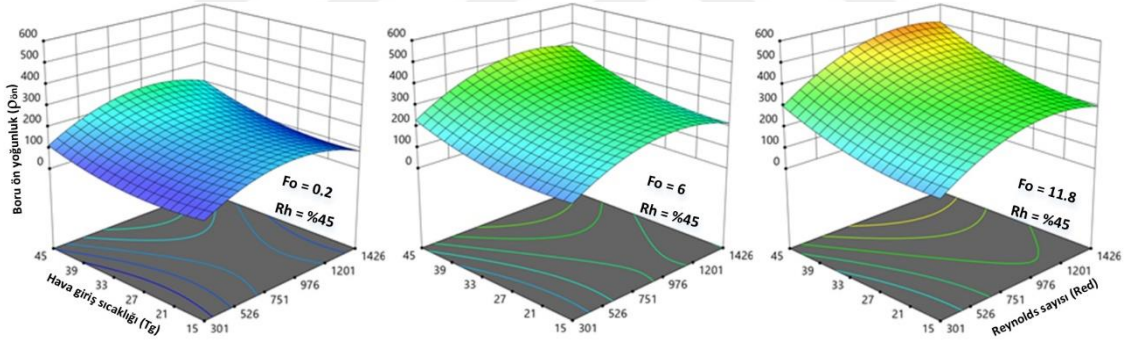


Şekil 3.28. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma kalınlığı oranı üzerindeki etkisi

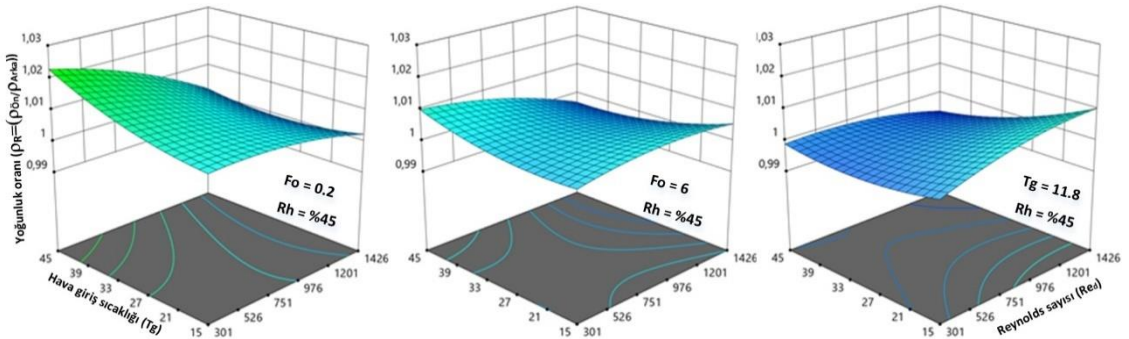
Ele alınan çalışma silindirik bir boru yüzeyinde ısı ve kütle geçişine örnek teşkil etmektedir. İlk olarak uygulanan kütle akışının bir kısmı (su buharı) faz değiştirerek katı faza geçmektedir. Bu durum kütle akışının tamamının faz değiştirdiği anlamına gelmez. Çünkü yapılan çalışmalar göstermektedir ki; kütle akışının bir bölümü faz değişimine bağlı olarak karlanmanın oluşmasına ve artmasına, bir bölümü ise oluşan karlanma kütlelerinin yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada karlanma yoğunluğu için mevcut bağımsız parametreleri göz önüne alan kabul görmüş ve değiştirilmiş bağıntılar kullanılmaktadır. Buna göre boru ön ve arka yüzeyinde oluşan karlanma yoğunluk oranının zamana göre değişimi Şekil 3.28 'de verilmektedir. Burada göz önüne alınması gereken önemli bir durumda uygulanan kütle akışının hangi oranda karlanmaya dönüştüğü ya da yoğunluğunun artmaya neden olduğunun tespit edilmesidir. Boru ön ve arka yüzeyinde yoğunluk oranı irdelenir ise; boru ön yüzeyindeki yoğunluk daima arka yüzeyindeki yoğunluktan daha fazladır ($\rho_R > 1$). Re_d' nin ρ_R üzerindeki etkisi önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Re_d' nin yüksek değerlerinde ρ_R değeri $Fo = 0,2$ 'de daha düşüktür. Bu durum karlanma kalınlığının düşük olduğu durumlarda difüzyon, dolayısı ile yoğunluk artışının nispeten düşük olduğunu göstermektedir. Ancak boyutsuz zamanın ilerlemesi ile atalet kuvvetleri attıkça difüzyonunda arttığı ve başlangıca göre ρ_R değerinin zamanla arttığı görülmektedir (Şekil 3.29). Yapılan çalışmalarda uygulanan bağımsız parametrelere göre karlanma yoğunluk değerinin 600 kg/m^3 değerlerine kadar yükseldiği ve bu değerlerin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Boru ön yüzeyinde yoğunluk değişimi Şekil 3.30 'de verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük T_{hg} değerlerinde karlanmanın yüksek, düşük T_{hg} değerlerinde ise karlanma yoğunluğu daha yüksek olmaktadır. Bu durum; yüzeyde faz değişiminin yüksek sıcaklıkta daha yavaş olması ve gözenekli bir yapıya sahip olan karlanma içerisine su buharının nüfuz etmesi, böylece yoğunluğu nispeten daha yüksek olması sonucuna dayandırılmaktadır. Bu fiziksel durumdan dolayı ρ_R' de 1 'de büyük olmaktadır (Şekil 3.31).



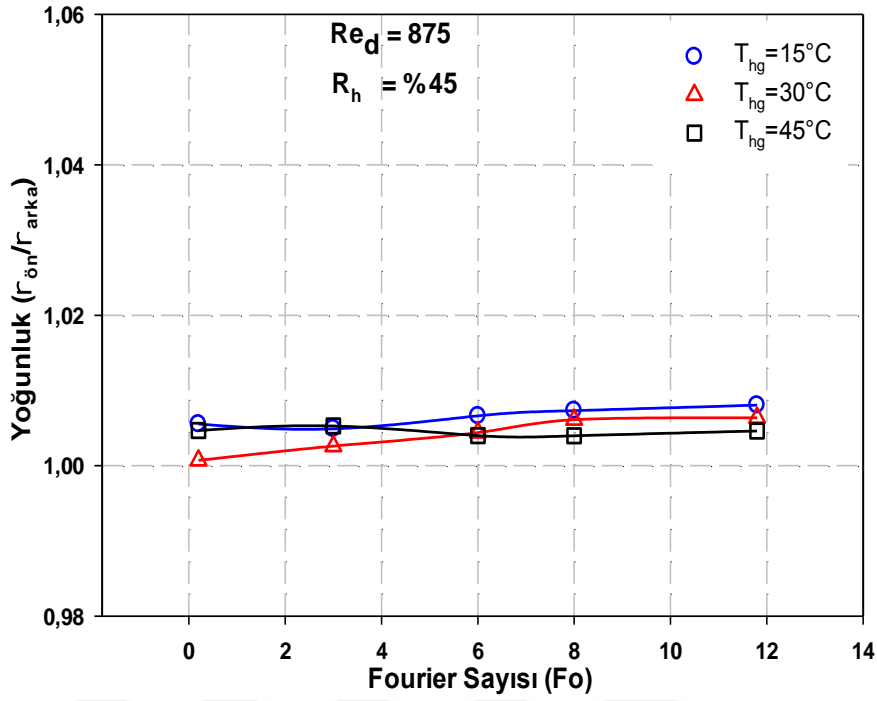
Şekil 3.29. $T_{hg}=30^{\circ}C$, $R_h=\%45$ ve farklı Reynolds sayılarında karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi



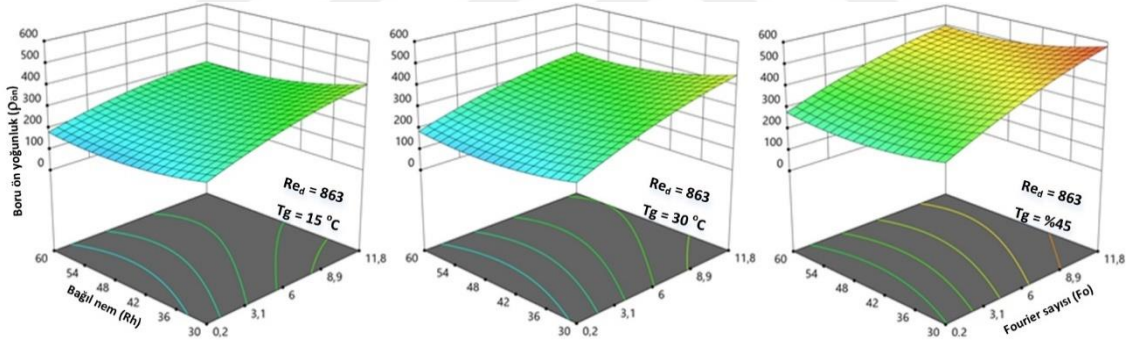
Şekil 3.30. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi



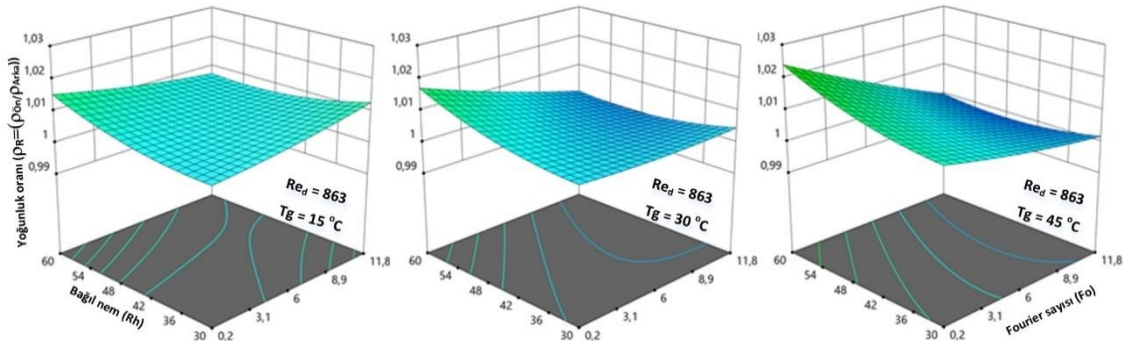
Şekil 3.31. $R_h = \%45$ için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi



Şekil 3.32. Re_d=875, R_h=%45 ve farklı T_{hg}' lerde karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi

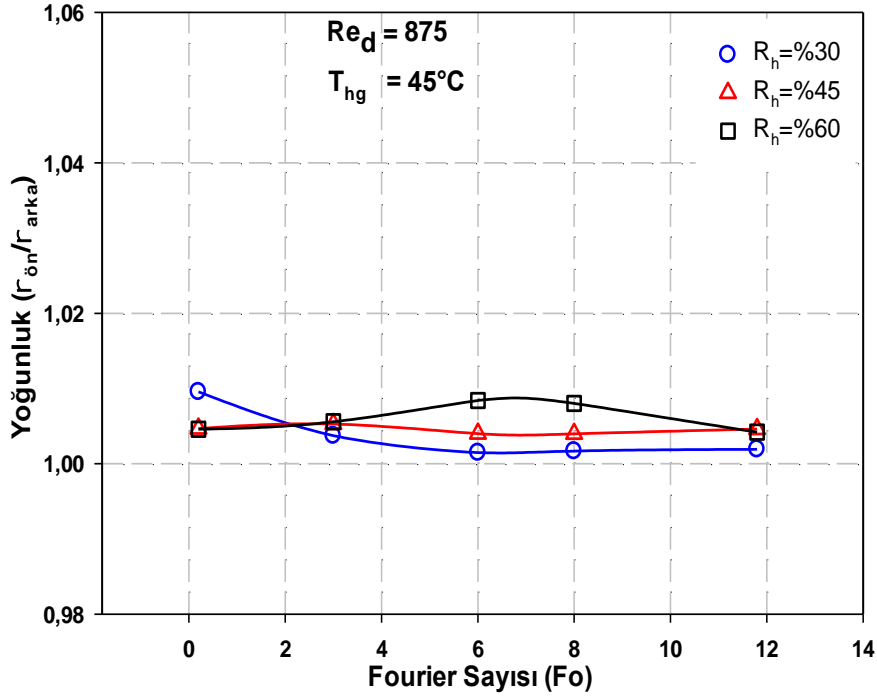


Şekil 3.33. Re_d = 863 için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi

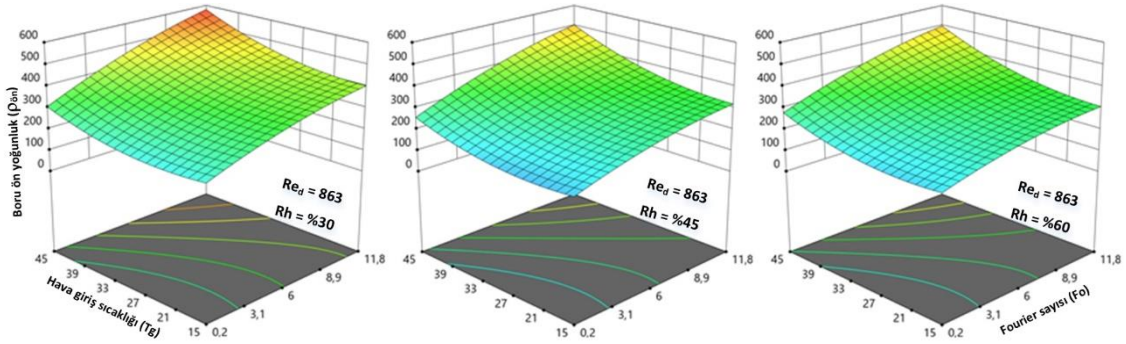


Şekil 3.34. Re_d = 863 için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi

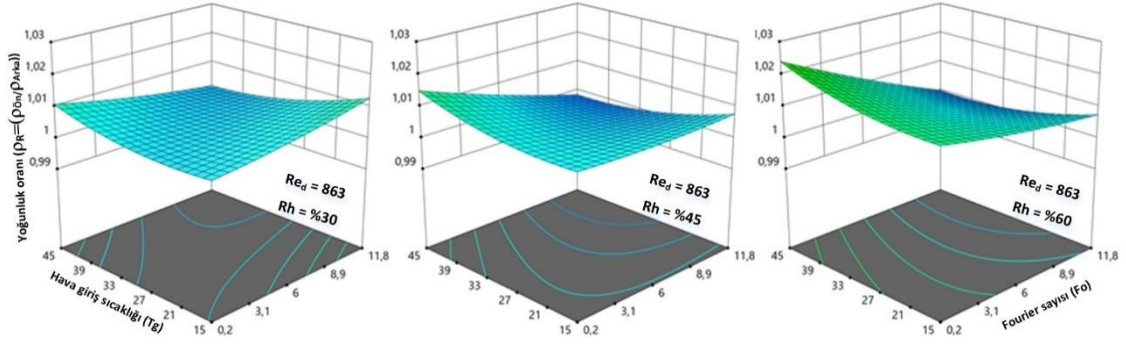
Boru ön tarafında oluşan yoğunluk artışının değeri Şekil 3.35 'de görülmektedir. R_h ' nin düşük değerlerinde ρ' nin boyutsuz zamana göre azalan, R_h ' nin yüksek değerlerinde ise artan eğilimde olduğu belirlenmiştir. Hatta $R_h = \%45$ için ρ' nin yaklaşık sabit kaldığı tespit edilmiştir. Fo ' nun yüksek değerlerinde T_{hg}' nin ρ_R üzerindeki etkisi daha fazla olmaktadır (Şekil 3.36). Ayrıca artan zaman ile ρ_R ' ninde R_h ' a bağlı olarak azaldığı görülmektedir.



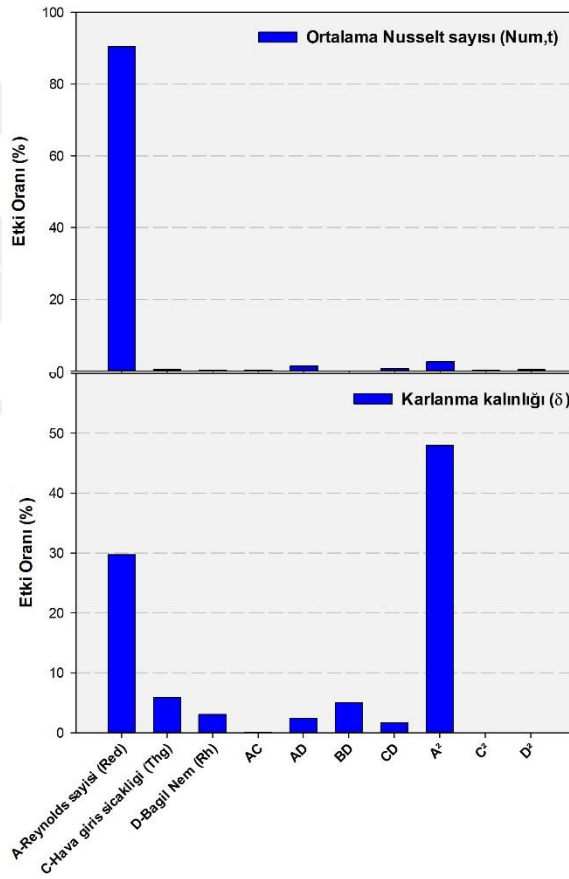
Şekil 3.35. $Re_d=875$, $T_{hg}=45^\circ\text{C}$ ve farklı R_h ' lerde karlanma yoğunluğunun zamana göre değişimi



Şekil 3.36. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin borunun ön tarafındaki karlanma yoğunluğu üzerindeki etkisi



Şekil 3.37. $Re_d = 863$ için bağımsız parametrelerin karlanma yoğunluğu oranı üzerindeki etkisi



Şekil 3.38. Bağımsız parametrelerin ortalama Nusselt sayısı ve karlanma kalınlığı üzerindeki etki oranları

Deney tasarım yöntemi kullanılarak (Yanıt Yüzey Metodu) her bir bağımsız parametrenin ısı transferi ve karlanma kalınlığı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil. 3.39). Bu değerlendirme yönteminde zaman parametresi (Fo) değerlendirme dışında tutulmuştur. Elde edilen verilere göre hem ısı transferi ve hem de karlanma kalınlığı üzerindeki en etkin parametrenin Reynolds sayısı olduğu görülmektedir. Bu durumun fiziksel gerekçesi yukarıda detaylı olarak

tartışılmıştır. İkinici sırada hava giriş sıcaklığı, üçüncü sırada ise hava bağıl neminin etkili olduğu görölmektedir.



4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, silindir bir boru etrafında meydana gelen karlanma ve donmanın ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İç çapı 10 mm ve dış çapı 14 mm olan alüminyum boru, 150 mm genişliğe, 140 mm yüksekliğe ve 2500 mm uzunluğa sahip şeffaf pleksi malzemenle imal edilen hava akış kanalına yerleştirilmiştir. Deneysel Reynolds sayısının 300, 506, 875, 1124 ve 1426, hava bağıl neminin %30, %45, %60 ve hava giriş sıcaklığının 15°C, 30°C ve 45°C değerleri için gerçekleştirilmiştir. Deneysel silindir boru hattında soğutma sıvısı akışkanı olarak antifriz (etilen-glikol) kullanılmıştır. Silindir boru girişinde soğutma sıvısı sıcaklığı -30°C'de sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmadan aşağıdaki bulgular elde edilmiştir;

- Isı transferi ve karlanma kalınlığı üzerindeki en etkin parametre Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısı arttıkça ısı transferi artmaktadır.
- Bağımsız parametre olarak boyutsuz zaman (Fo) değerlendirme dışında tutulur ise ısı transferi ve karlanma kalınlığı üzerinde Reynolds sayısından sonra en etkin parametre hava giriş sıcaklığıdır (T_{hg}). Hava giriş sıcaklığını hava bağıl nemi (R_h) takip etmektedir.
- Karlanma kalınlığı dikey boruda, boru alt tarafında daha hızlı artmaktadır. Bu durum yerel ısı taşınım katsayısının (h_y) boru alt tarafında daha düşük, yukarı doğru ilerledikçe nispeten daha yüksek olmasına neden olmaktadır.
- Hem ısı transferi hem de karlanma kalınlığı üzerinde Reynold sayısı ile hava bağıl neminin etkileşiminin önemi artmaktadır. Reynolds sayısının artması ya da azalması hava bağıl neminin etkisini değiştirebilmektedir.
- Hava giriş sıcaklığının değişimi de hava bağıl neminin ısı transferi ve karlanma kalınlığı üzerindeki etkisini arttırmaktadır.
- Yerel ısı taşınım katsayısının etkisinden dolayı boru ön yüzeyinde hem ısı transferi hem de karlanma kalınlığı boru arka yüzeyine göre daha fazladır.

Öneriler;

- Reynolds sayısının daha geniş aralığında (türbülanslı akış) deneylerin geliştirilmesi yararlı görülmektedir.
- Genişletilmiş yüzeylerin karlanma kalınlığına ve ısı transferine etkisi değerlendirilmelidir.
- Boru yüzey sıcaklığının farklı aralıklarında deneylerin genişletilmesi yararlı görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Amer, M., & Wang, C. C. (2017). Review of defrosting methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(October 2016), 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.120>
- Azimi Yancheshme, A., Momen, G., & Jafari Aminabadi, R. (2020). Mechanisms of ice formation and propagation on superhydrophobic surfaces: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 279, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102155>
- Bahadur, V., Mishchenko, L., Hatton, B., Taylor, J. A., Aizenberg, J., & Krupenkin, T. (2011). Predictive model for ice formation on superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 27(23), 14143–14150. <https://doi.org/10.1021/la200816f56>
- Bluhm, J., Ricken, T., & Bloßfeld, M. (2011). Ice formation in porous media. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 59 LNACM, 153–174. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22738-7_8
- Byun, S., Jeong, H., Kim, D. R., & Lee, K. S. (2020). Frost modeling under cryogenic conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 161, 120250. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120250>
- Cheng, C. H., & Shiu, C. C. (2002). Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(21), 4289–4303. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00134-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00134-5)
- Elliott, J. W., & Smith, F. T. (2017). Ice formation on a smooth or rough cold surface due to the impact of a supercooled water droplet. *Journal of Engineering Mathematics*, 102(1), 35–64. <https://doi.org/10.1007/s10665-015-9784-z>
- Fertelli, A., Büyükalaca, O., & Yilmaz, A. (2009). Ice formation around a horizontal tube in a rectangular vessel. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 29(2), 75–87.
- Hakimian, A., Nazifi, S., & Ghasemi, H. (2020). Physics of Ice Nucleation and Growth on a Surface. *Ice Adhesion*, December, 87–110. <https://doi.org/10.1002/9781119640523.ch3>
- Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S., & Hori, K. (1977). Study of frost properties correlating with frost formation types. *Journal of Heat Transfer*, 99(2), 239–245. <https://doi.org/10.1115/1.3450675>
- Hervatte, A. M. (2021). CFD Simulation of a Fin-Tube evaporator under icing.
- Heu, C. S., Kim, S. W., Kim, J., Lee, S., Kim, J. M., Lee, K. S., & Kim, D. R. (2018). Frosting and defrosting behavior of slippery surfaces and utilization of mechanical vibration to enhance defrosting performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.146>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. *John Wiley*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>
- Kim, T. W. (2006). Physically-Based Simulation of Ice Formation. *University of North Carolina at Chapel Hill*.
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2015). Fluid mechanics: Sixth edition. *Fluid Mechanics: Sixth Edition*, 1–921.
- Lata, N. N. (2021). Digital Commons @ Michigan Tech PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF

ATMOSPHERIC AEROSOLS.

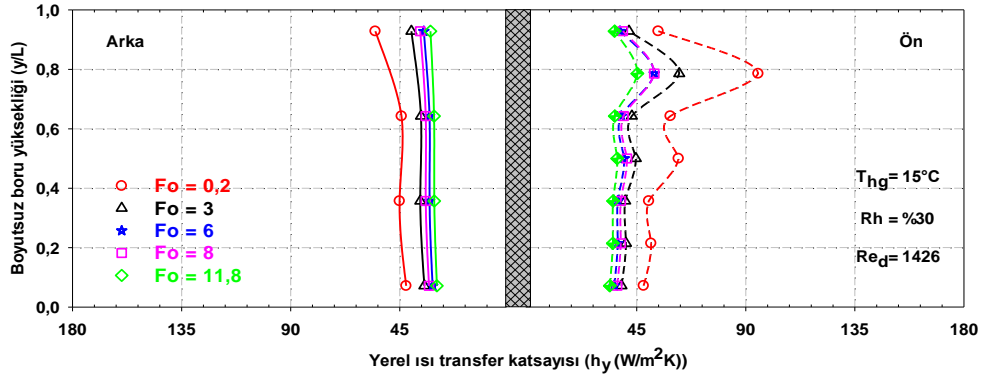
- Lee, J., Jeong, H., Kim, D. R., & Lee, K. S. (2019). Frost layer growth behavior under cryogenic conditions. *Applied Thermal Engineering*, 163(March), 114333. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114333>
- Lee, K.-S., Lee, D.-H., & Yang, D.-K. (2004). Frost Formation on a Cold Cylindrical Surface in Cross Flow. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 28(8), 989–995. <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2004.28.8.989>
- Lee, K. (2003). Prediction of the frost formation on a cold flat surface. 46, 3789–3796. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00195-9)
- Lee, K. S. ;Lee. T. H. ;Kim. W. S. . (1994). Heat and Mass Transfer of Parallel Plate Heat Exchanger under Frosting Condition. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* (C. 6, 2, ss. 155–165).
- Leoni, A., Mondot, M., Durier, F., Revellin, R., & Haberschill, P. (2017). Frost formation and development on flat plate: Experimental investigation and comparison to predictive methods. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.06.005>
- Léoni, A., Mondot, M., Durier, F., Revellin, R., & Haberschill, P. (2016). State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces. *International Journal of Refrigeration*, 68, 198–217. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.04.004>
- Liu, J., Zhu, C., Liu, K., Jiang, Y., Song, Y., Francisco, J. S., Zeng, X. C., & Wang, J. (2017). Distinct ice patterns on solid surfaces with various wettabilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(43), 11285–11290. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712829114>
- Liu, Z., Wang, H., Zhang, X., Meng, S., & Ma, C. (2006). An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part II. Long-term performance, frost layer observation and mechanism analysis. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.05.017>
- Mengjie, S., Chaobin, D., Shengchun, L., Zhili, S., & Ning, M. (2017). Frost layer thickness measurement and calculation: A short review. *Energy Procedia*, 142, 3812–3819. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.281>
- Ozcan, Y. (2018). Ice accretion prediction on wind turbine blades and aerodynamic shape optimization for minimizing power production losses. September.
- Qin, Y., Chen, C., Dong, B., Li, W., & Zhang, P. (2020). An experimental study on the frosting characteristics of multi-tube heat exchanger with spraying condensable additive at the temperature of 77 K and 240 K. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119882. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119882>
- Qin, Y., Dong, B., & Li, W. (2020). Experimental study of the frosting characteristic of water on a cold surface in the magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 114(January), 110044. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110044>
- Qu, K., Komori, S., & Jiang, Y. (2006). Local variation of frost layer thickness and morphology. *International Journal of Thermal Sciences*, 45(2), 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2005.05.004>

- Seker, D., Karatas, H., & Egrican, N. (2004). Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part I - Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 27(4), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2003.12.003>
- Shahane, S., Shen, Y., & Wang, S. (2021). Numerical Simulations of Frost Growth Using Mixture Model on Surfaces with Different Wettability. <https://arxiv.org/abs/2103.02737v1>
- Sheng, W., Liu, P., Dang, C., & Liu, G. (2017). Review of restraint frost method on cold surface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(March 2016), 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.088>
- Wang, W., Guo, Q. C., Feng, Y. C., Lu, W. P., Dong, X. G., & Zhu, J. H. (2013). Theoretical study on the critical heat and mass transfer characteristics of a frosting tube. 54, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.040>
- Wu, X., Chu, F., & Ma, Q. (2017). Frosting model based on phase change driving force. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 760–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.081>
- Wu, X., Ma, Q., & Chu, F. (2017). Numerical simulation of frosting on fin-and-tube heat exchanger surfaces. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 9(3). <https://doi.org/10.1115/1.4035925>
- Yang, D. K., & Lee, K. S. (2004). Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. *International Journal of Refrigeration*, 27(1), 89–96. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(03\)00118-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(03)00118-X)
- Yang, D. K., Lee, K. S., & Cha, D. J. (2006). Frost formation on a cold surface under turbulent flow. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.07.003>
- S., J., Kline. (1953). Describing Uncertainty in Single Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, 75:3-8.

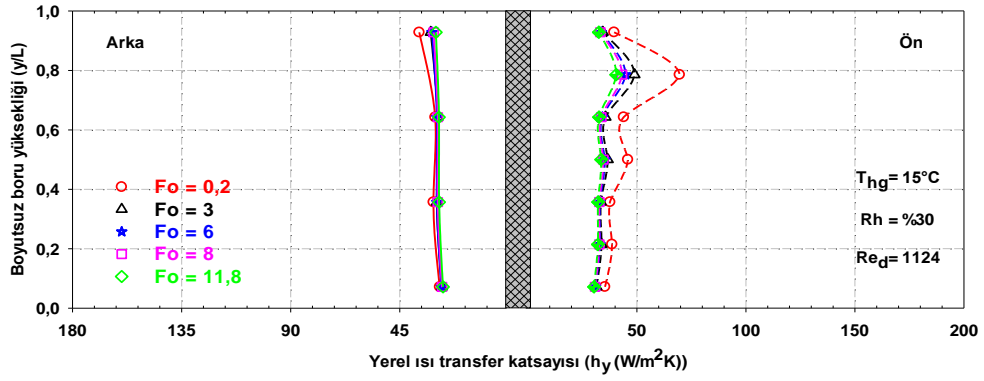
EKLER



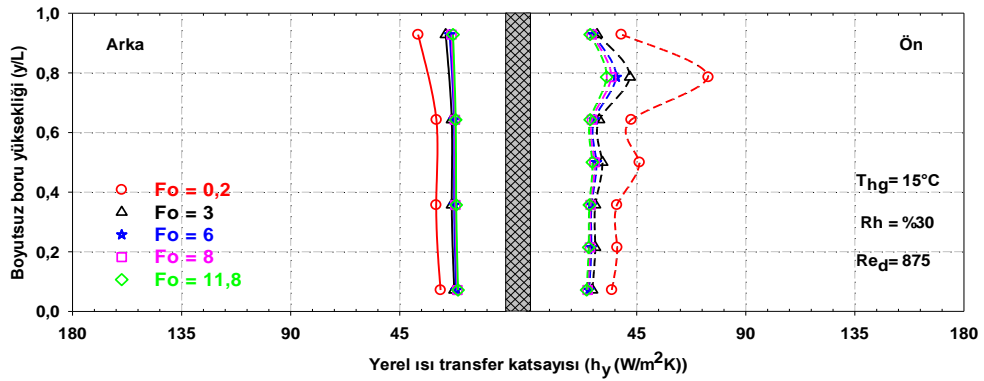
EK-1. Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.1. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

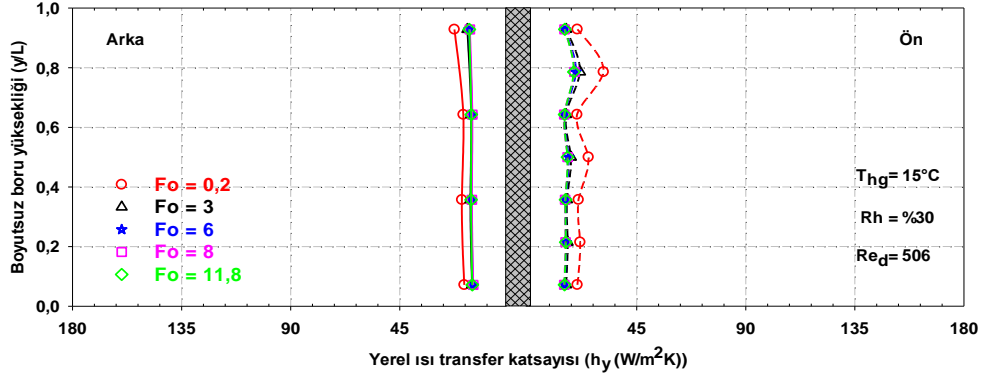


Şekil E1.2. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

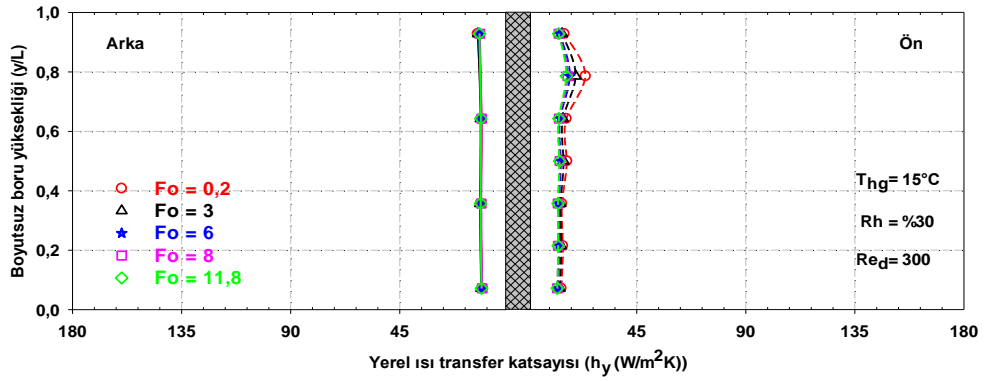


Şekil E1.3. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

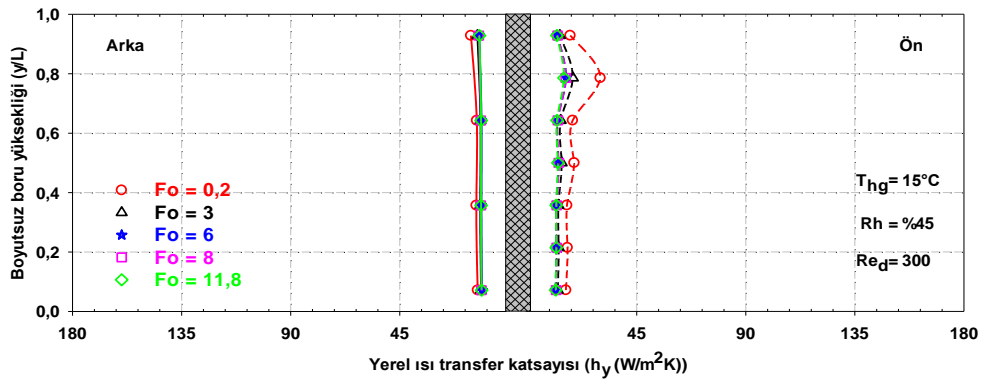
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.4. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

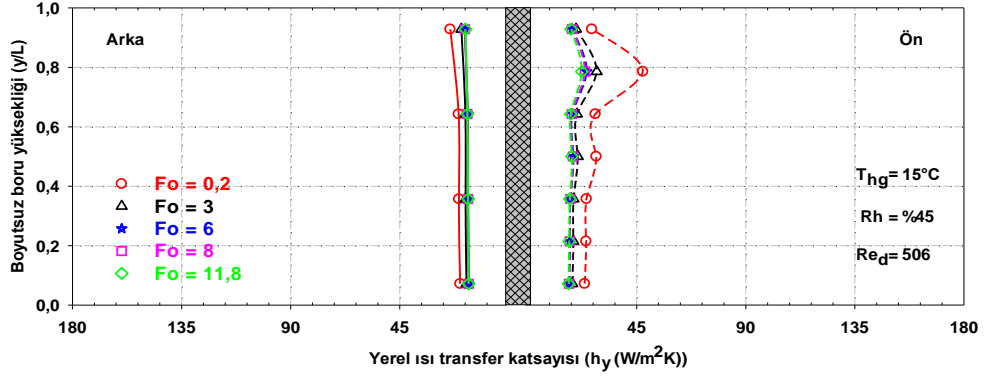


Şekil E1.5. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

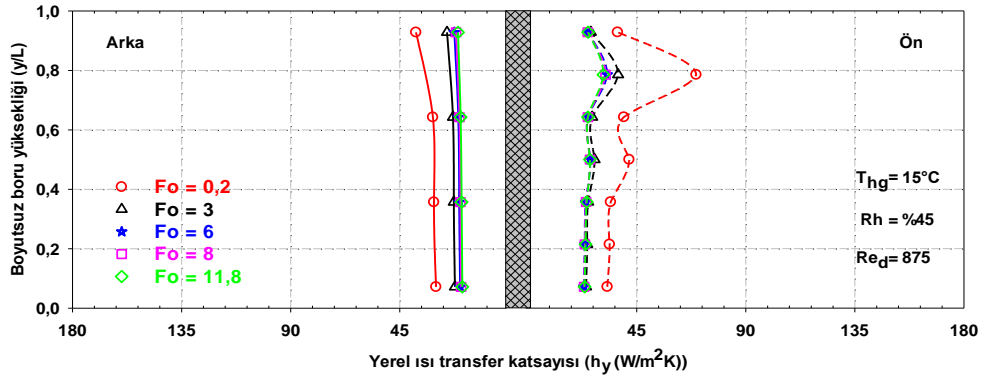


Şekil E1.6. $T_{hg}=15^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

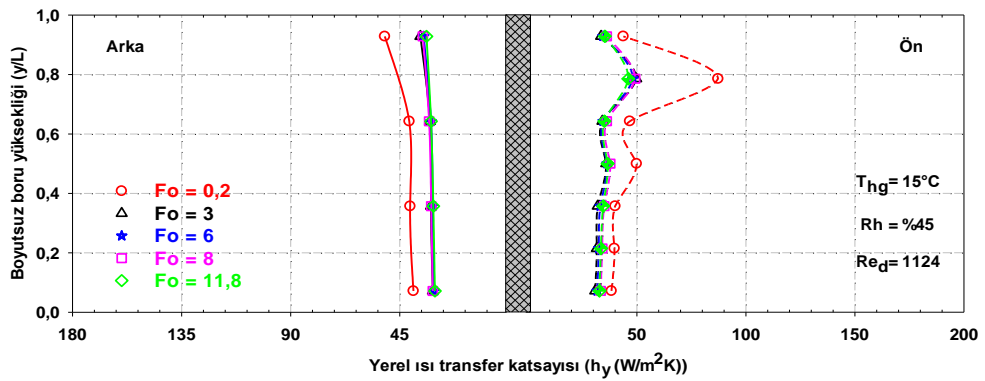
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.7. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

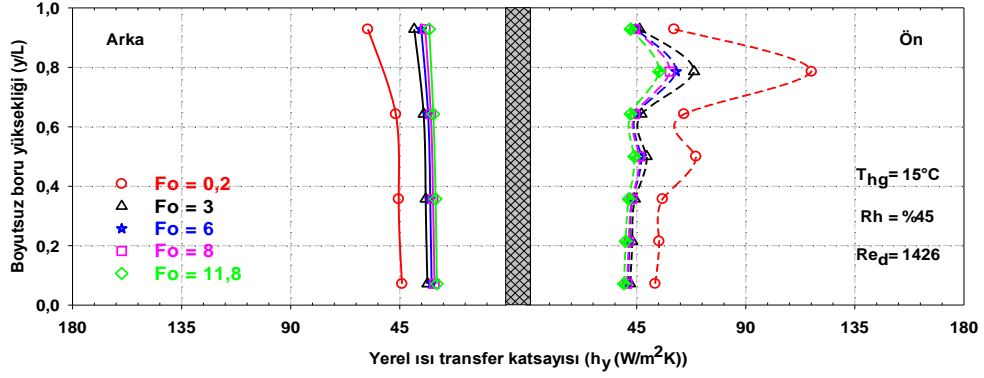


Şekil E1.8. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

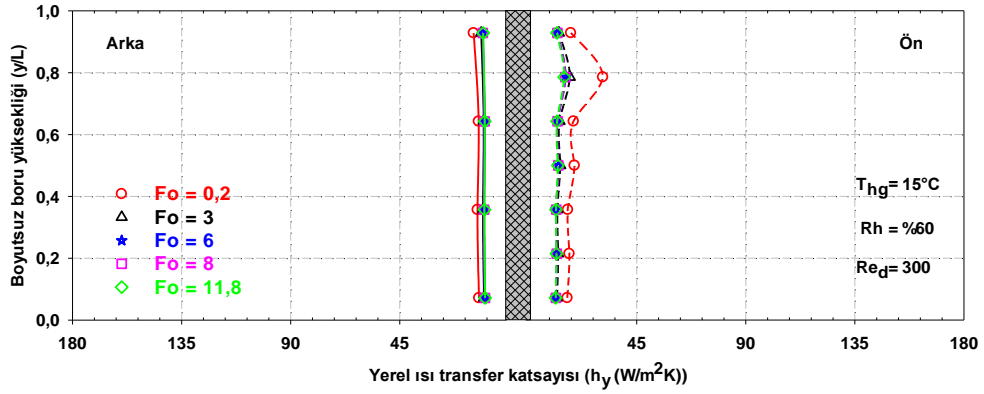


Şekil E1.9. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

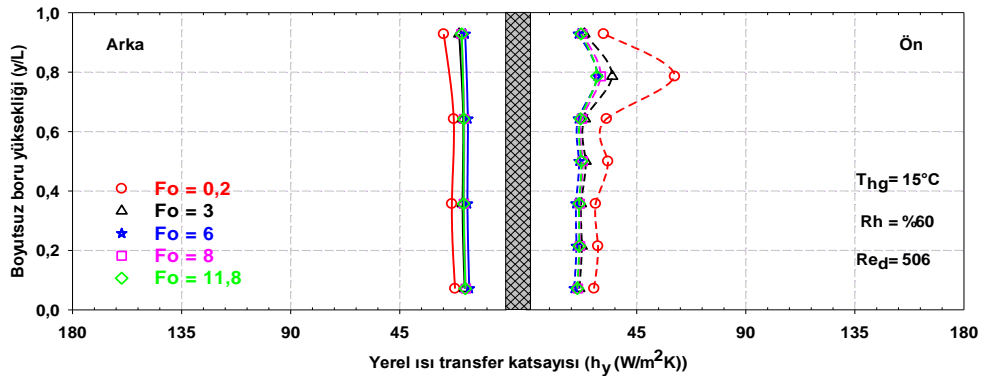
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.10. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

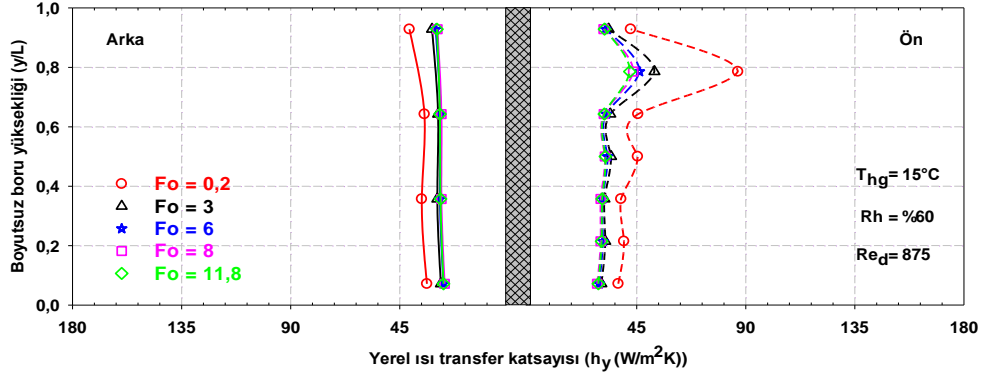


Şekil E1.11. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

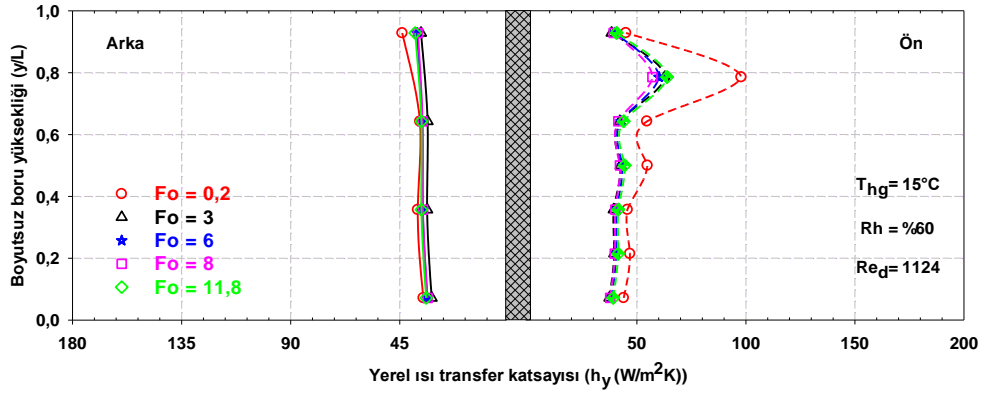


Şekil E1.12. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

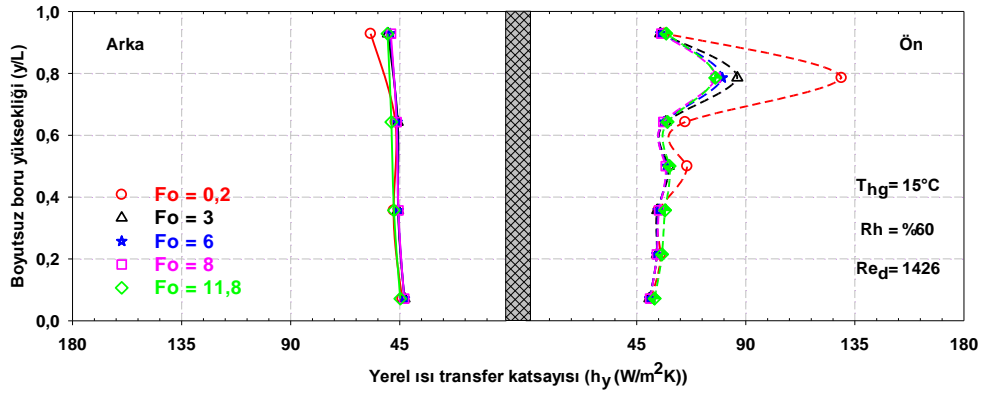
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.13. $T_{hg}=15^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

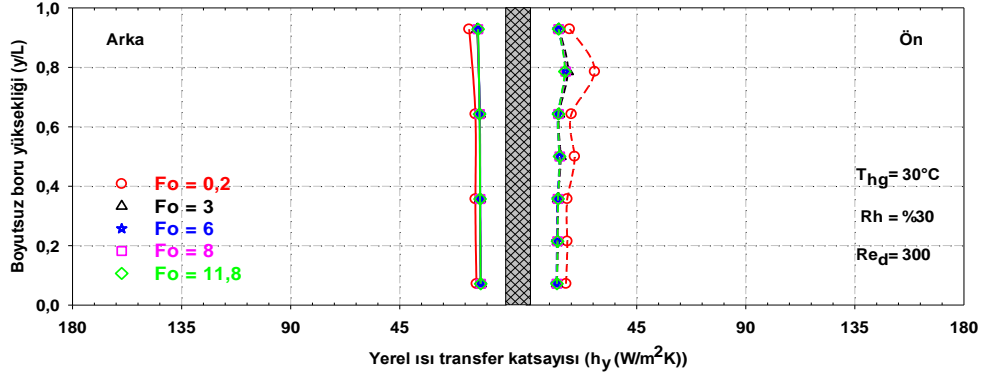


Şekil E1.14. $T_{hg}=15^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

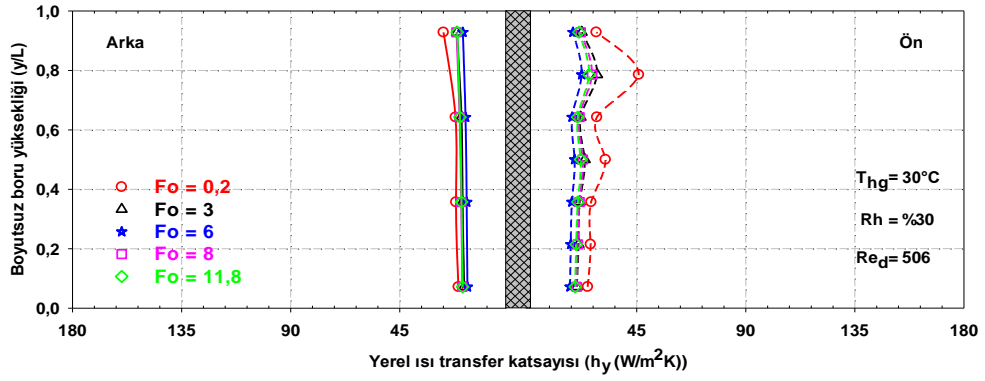


Şekil E1.15. $T_{hg}=15^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

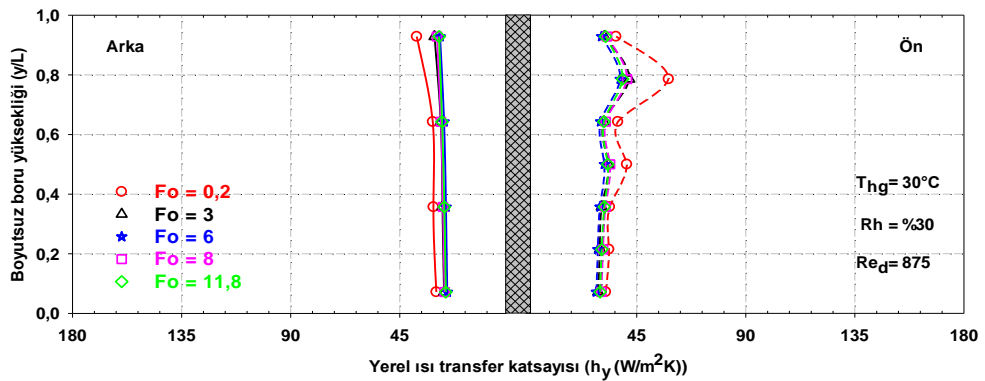
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.16. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

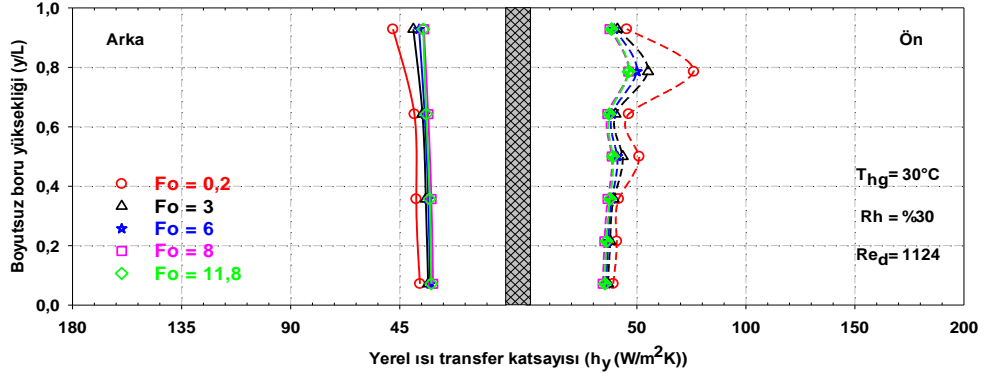


Şekil E1.17. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

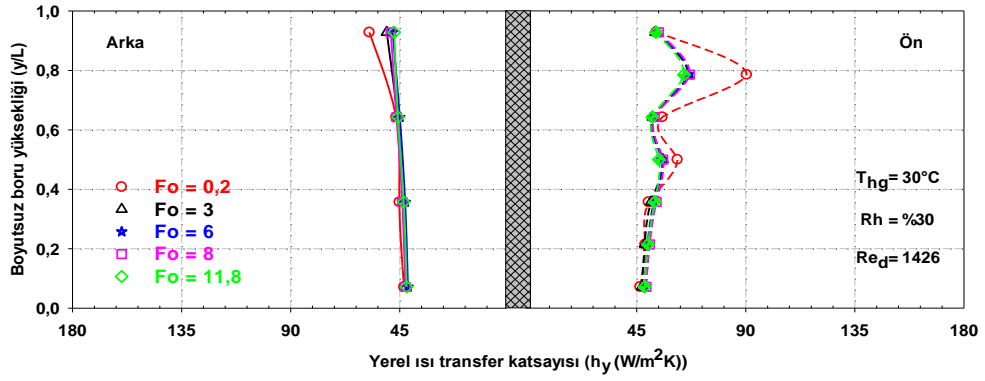


Şekil E1.18. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

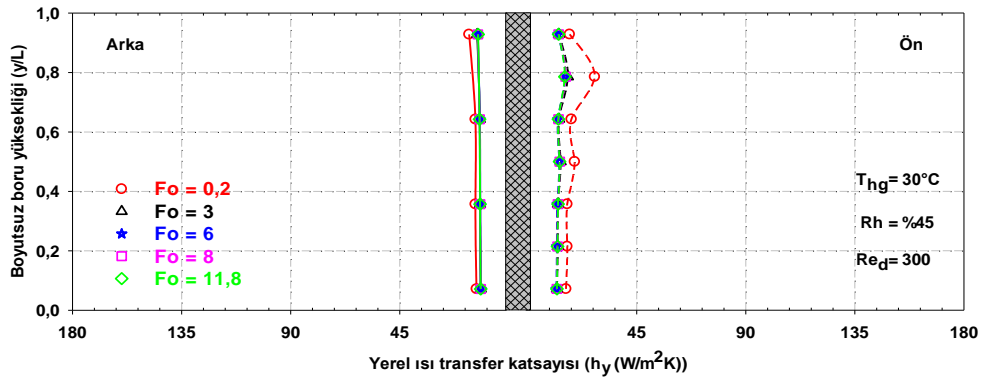
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.19. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

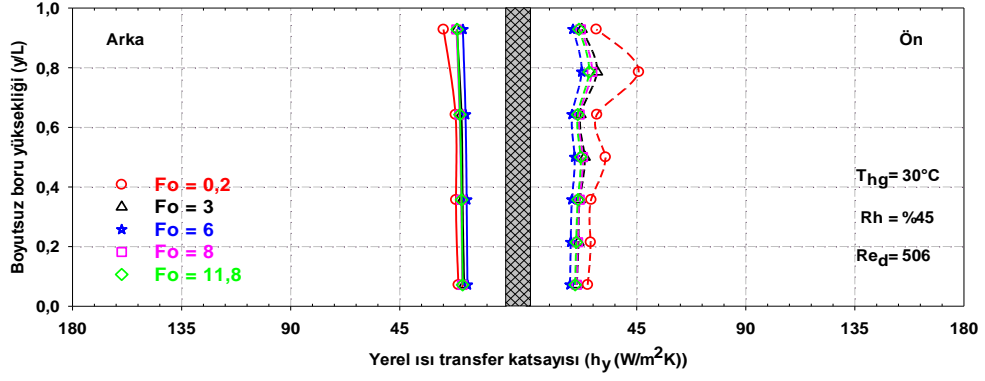


Şekil E1.20. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

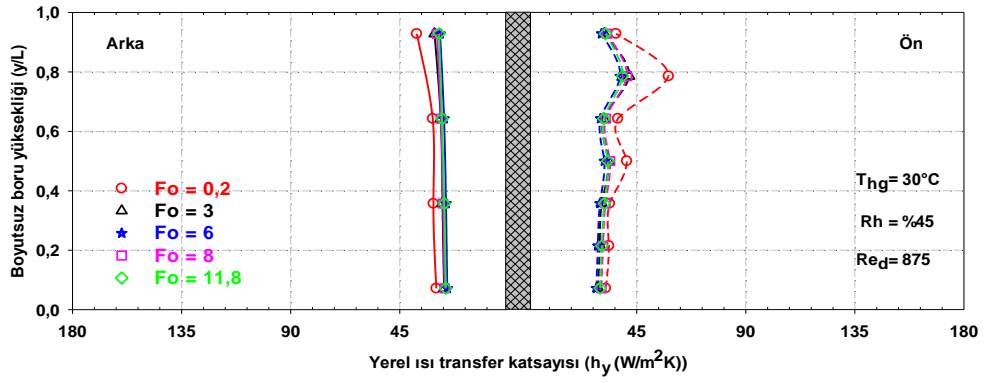


Şekil E1.21. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

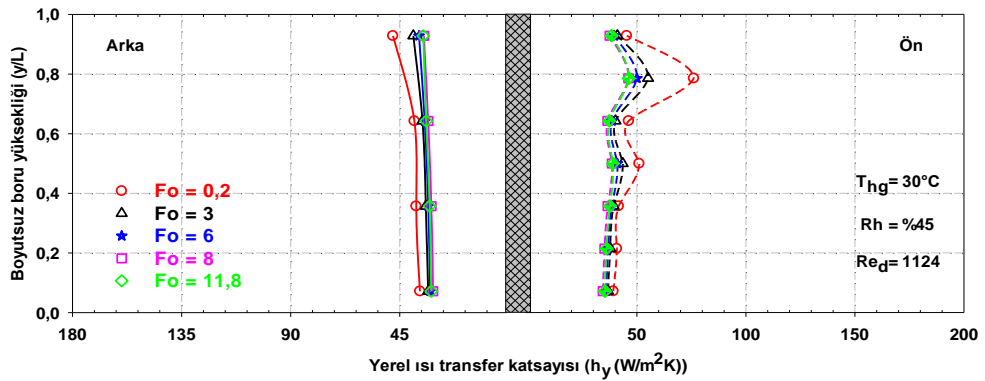
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin değişimi.



Şekil E1.22. T_{hg}=30°C, R_h=%45, Re_d=506 için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

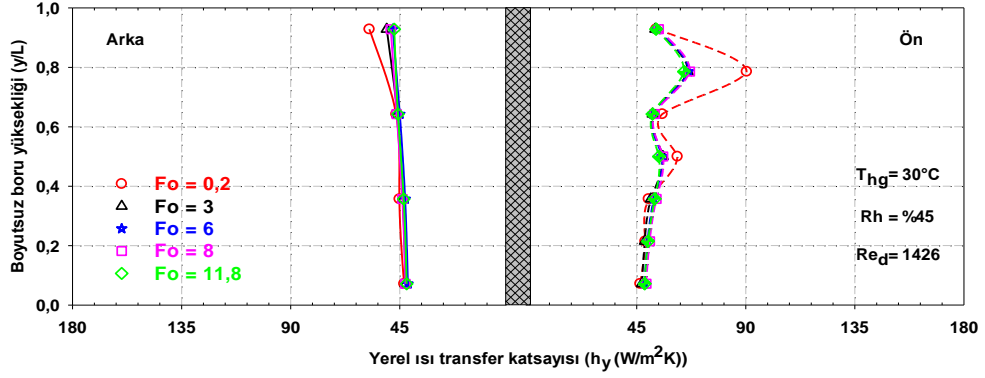


Şekil E1.23. T_{hg}=30°C, R_h=%45, Re_d=875 için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

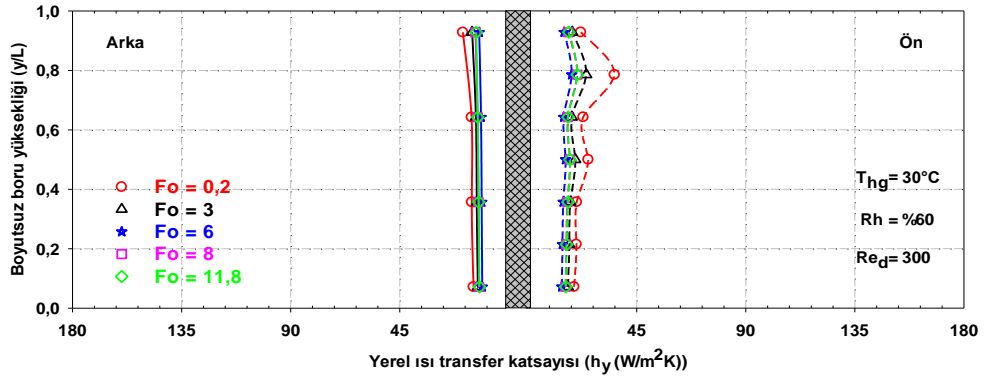


Şekil E1.24. T_{hg}=30°C, R_h=%45, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

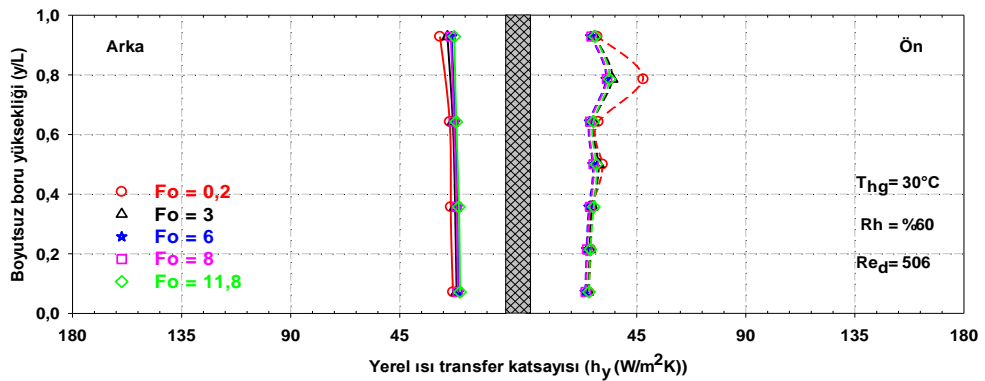
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.25. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

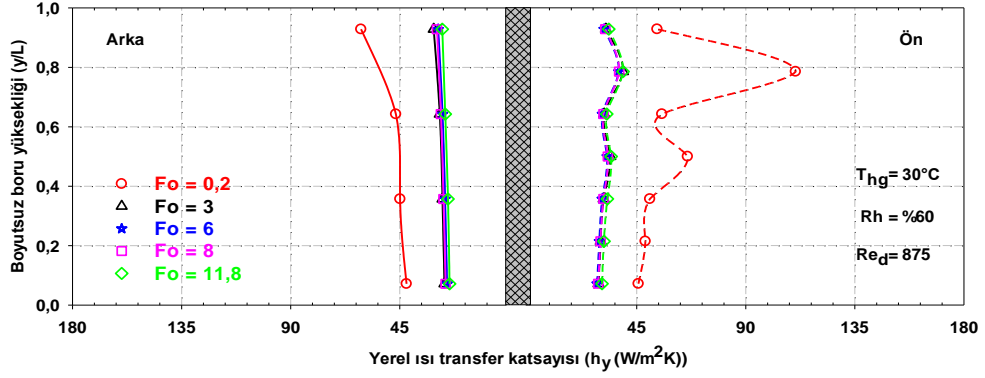


Şekil E1.26. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%60$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

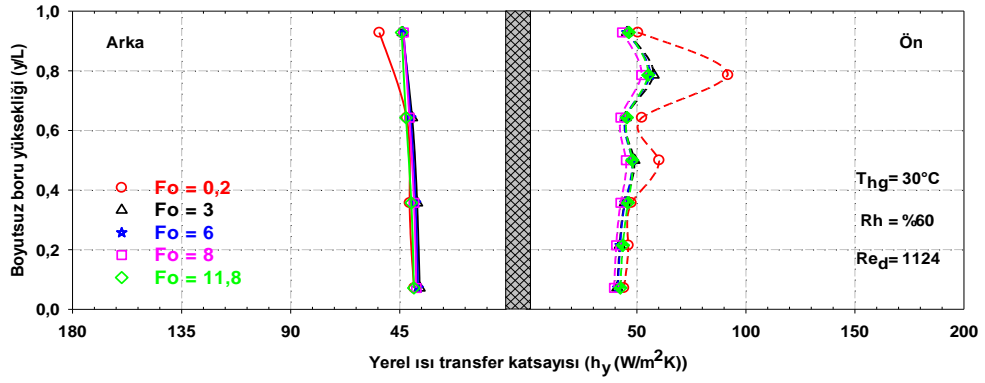


Şekil E1.27. $T_{hg}=30^\circ C$, $R_h=\%60$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

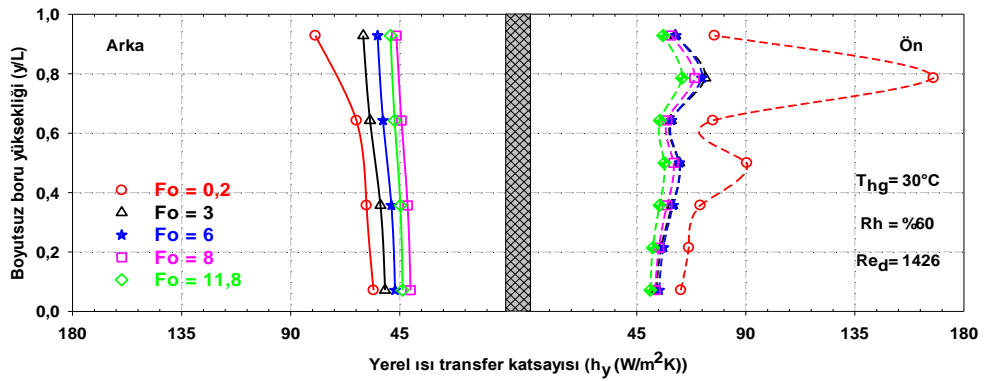
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.28. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

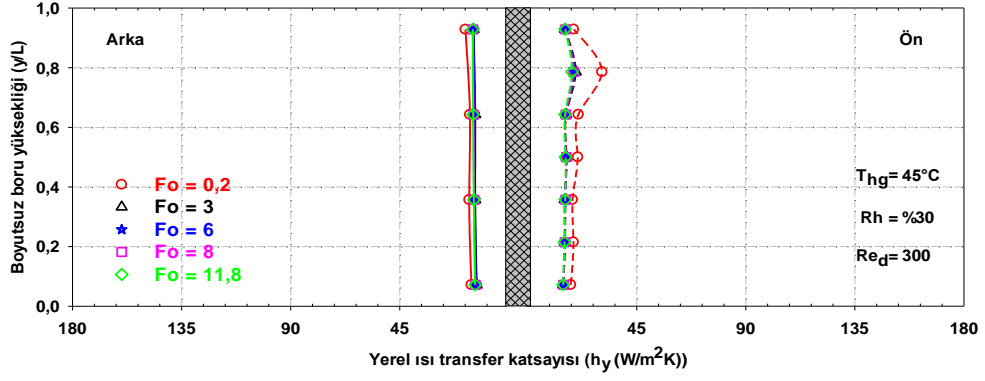


Şekil E1.29. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

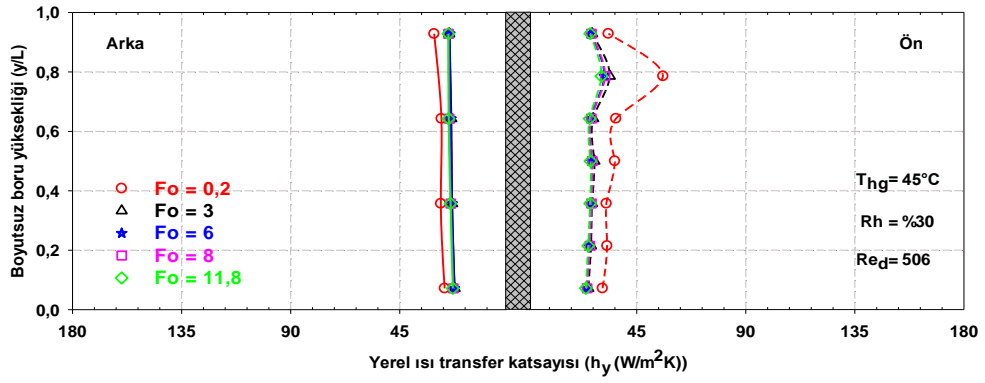


Şekil E1.30. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

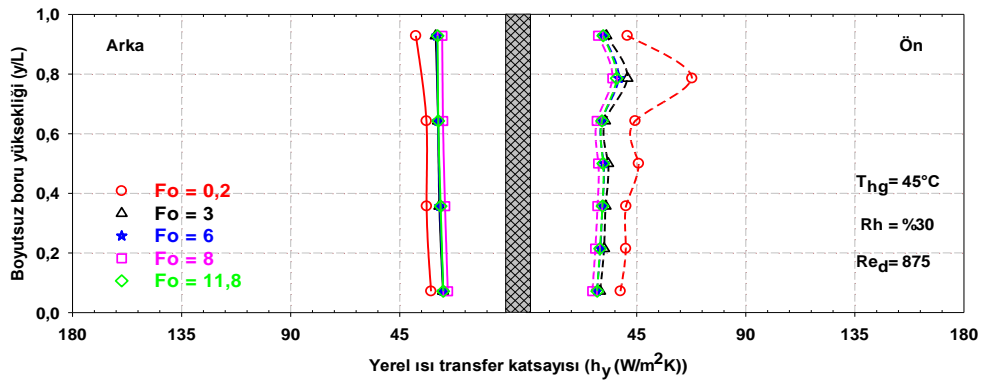
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.31. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

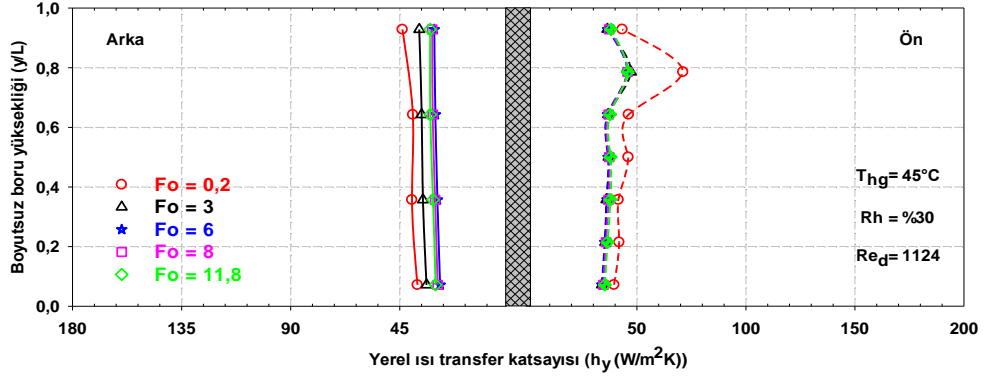


Şekil E1.32. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

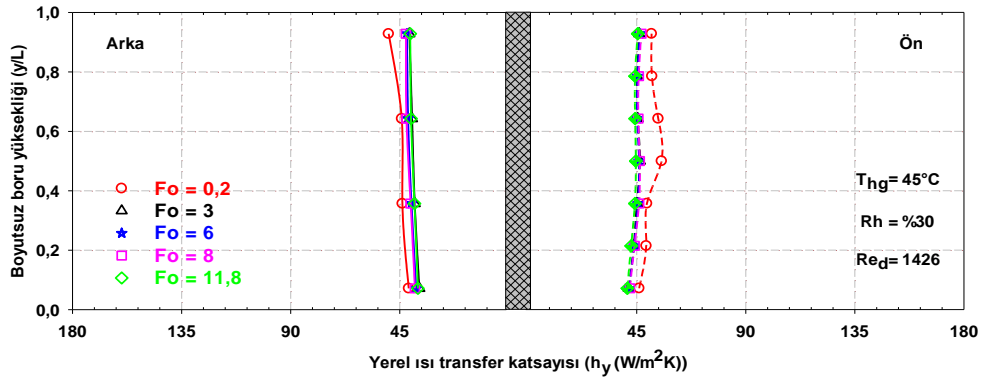


Şekil E1.33. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%30$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

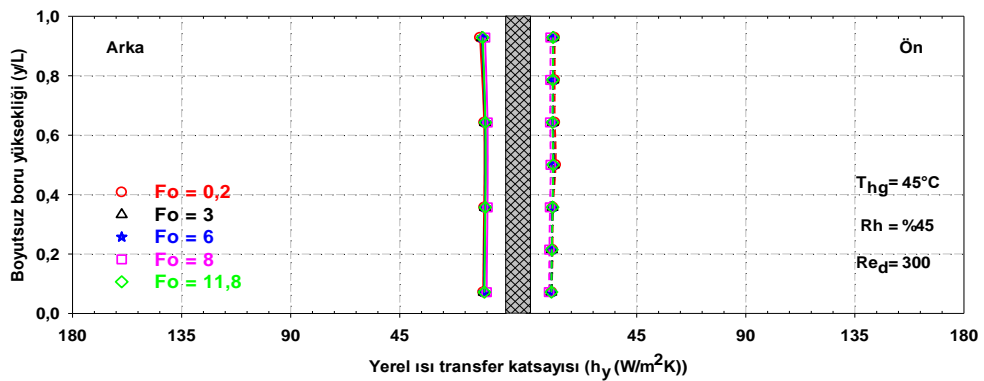
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.34. $T_{hg}=45^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%30$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

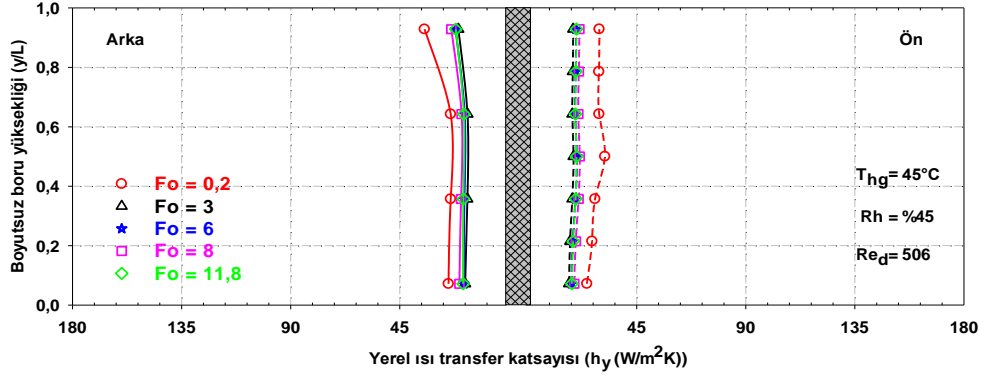


Şekil E1.35. $T_{hg}=45^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%30$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

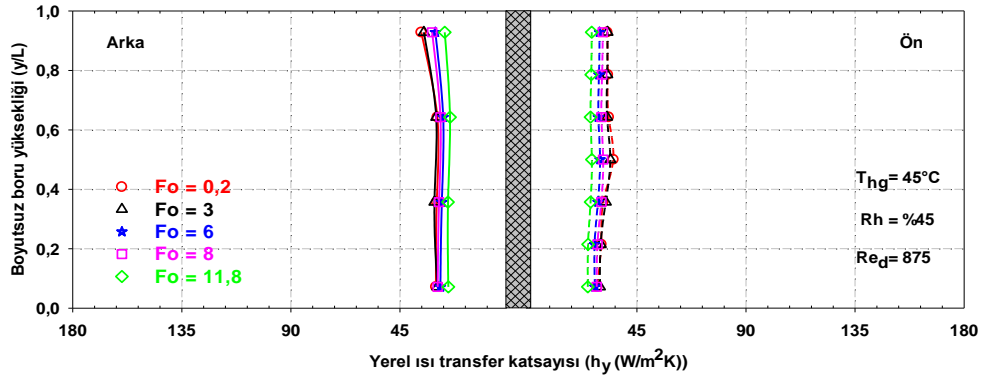


Şekil E1.36. $T_{hg}=45^{\circ}\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

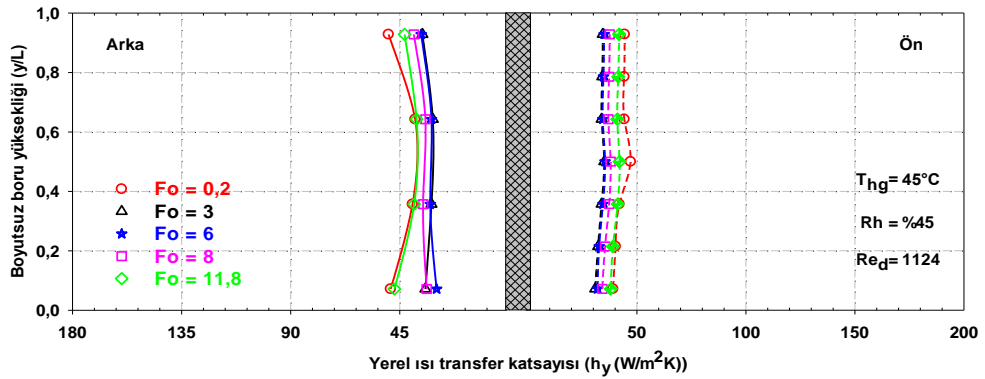
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.37. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

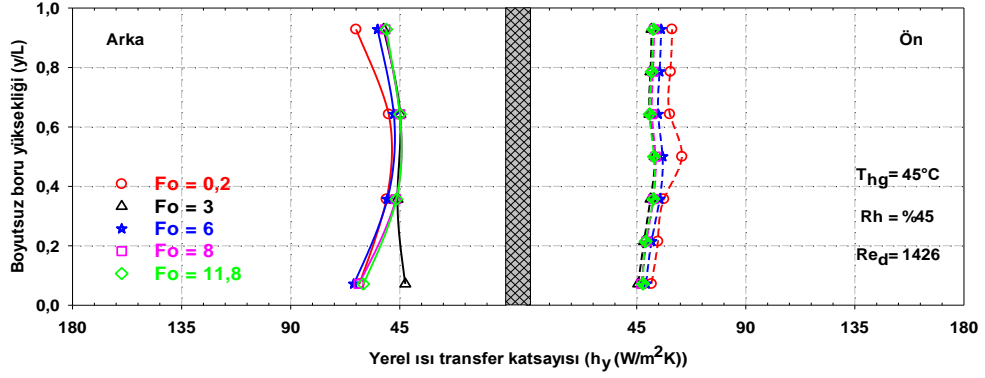


Şekil E1.38. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

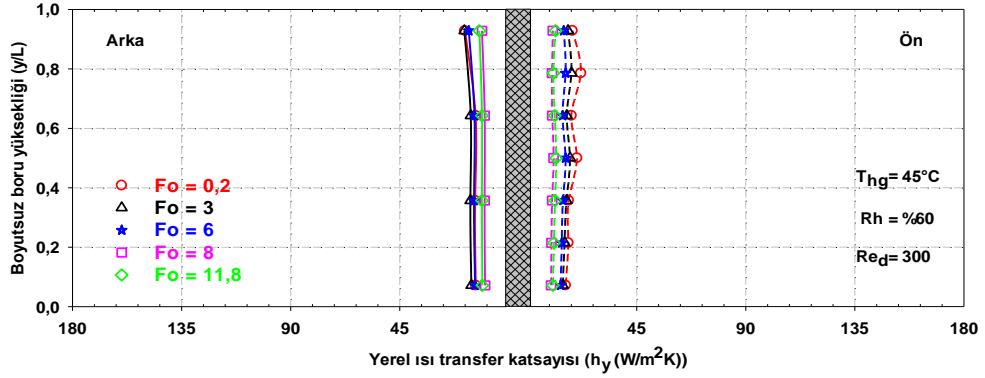


Şekil E1.39. $T_{hg}=45^\circ C$, $R_h=\%45$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

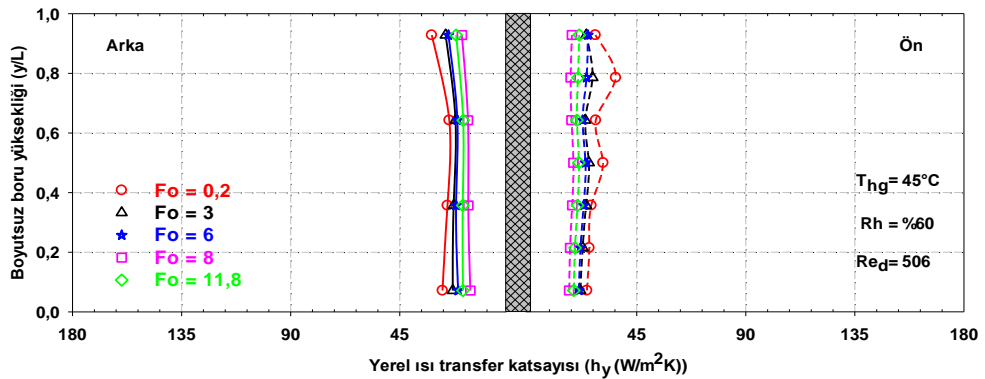
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.40. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%45$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

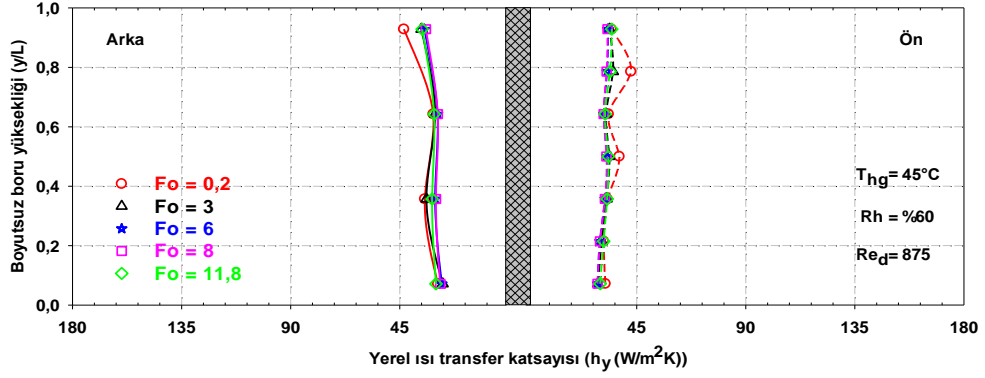


Şekil E1.41. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

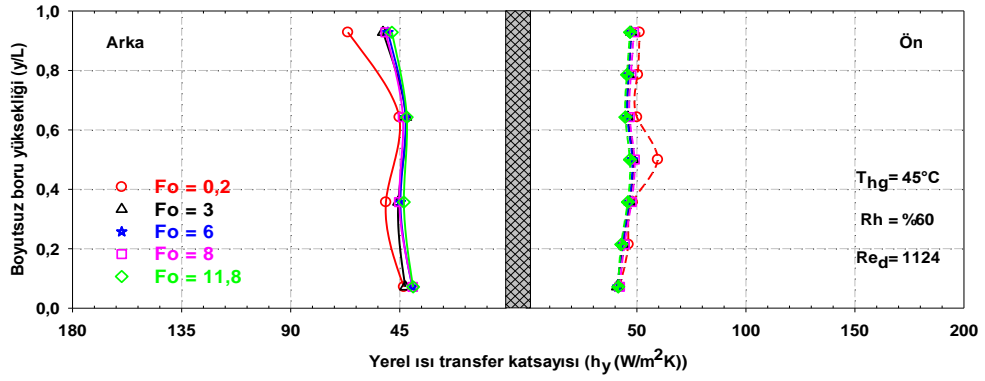


Şekil E1.42. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

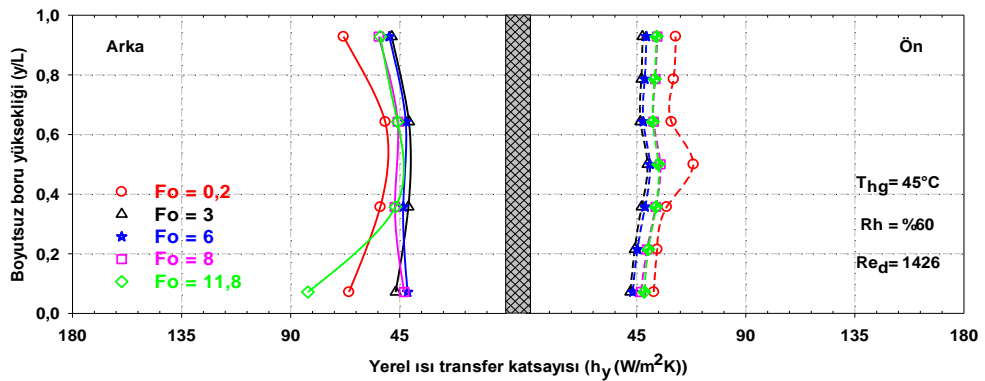
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.43. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

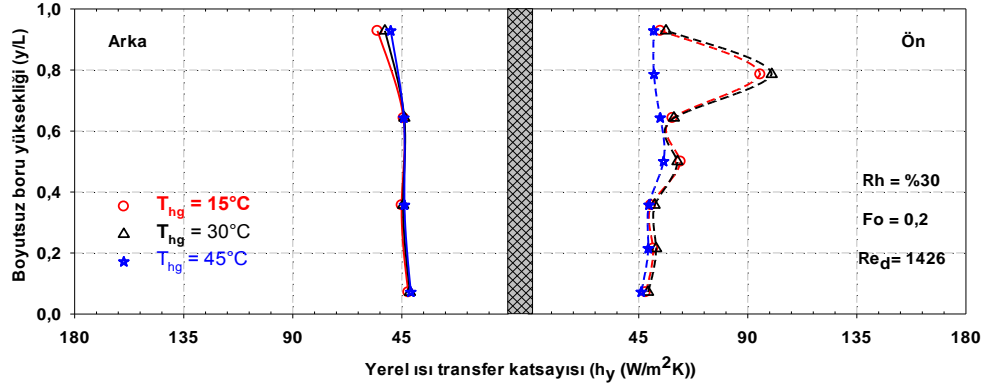


Şekil E1.44. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

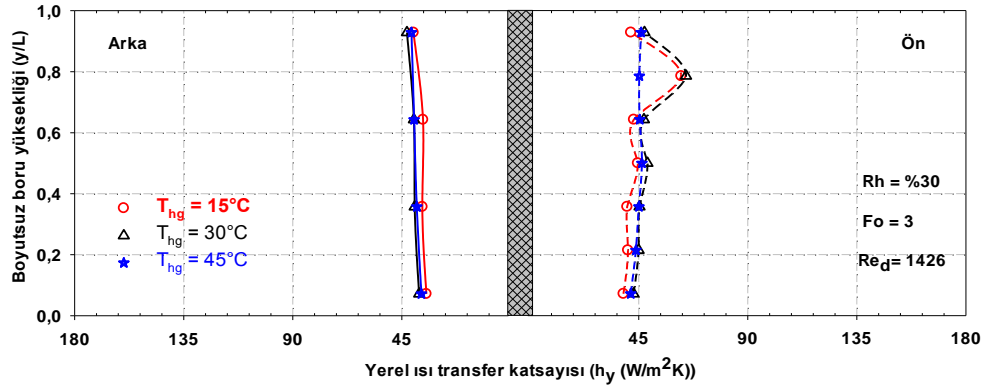


Şekil E1.45. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $R_h=\%60$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

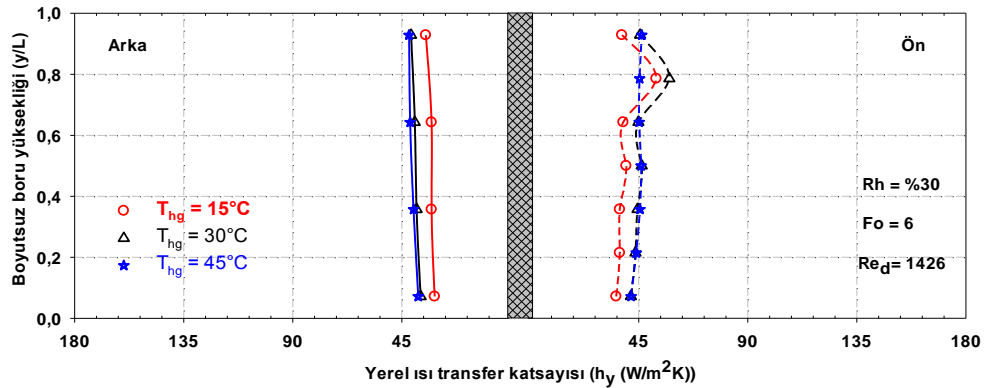
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.46. $R_h = \%30$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

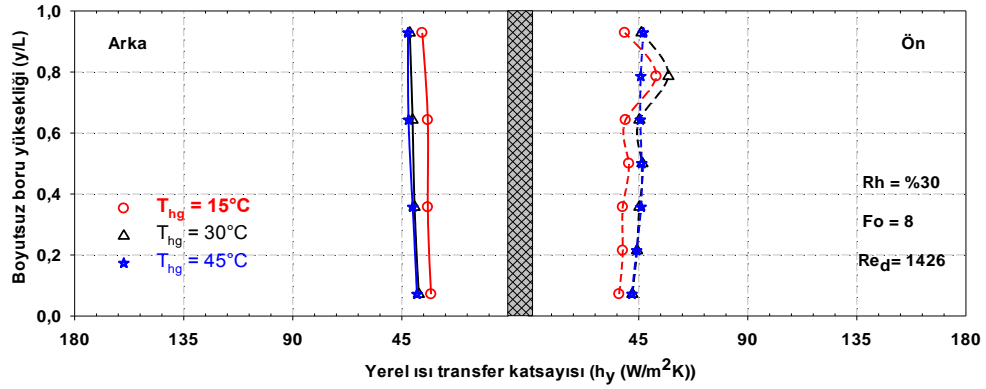


Şekil E1.47. $R_h = \%30$, $Fo = 3$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

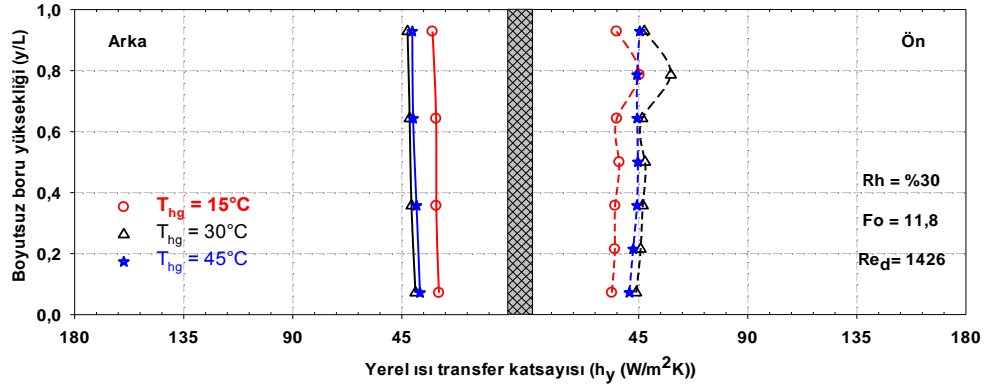


Şekil E1.48. $R_h = \%30$, $Fo = 6$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

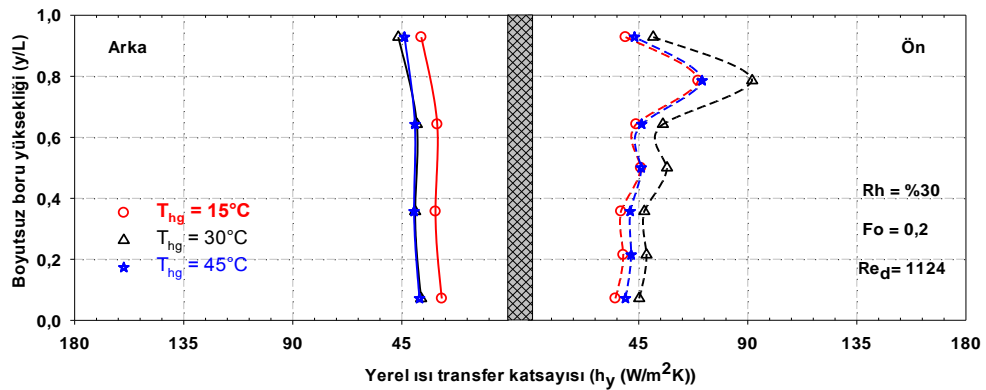
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.49. $R_h=\%30$, $Fo=8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

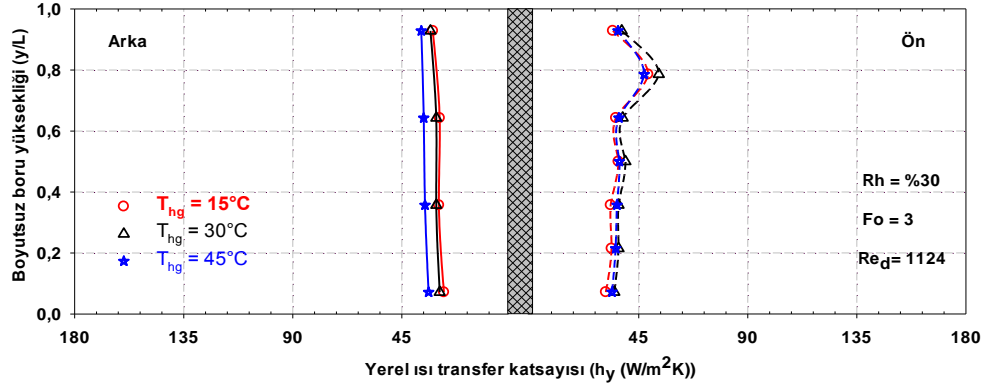


Şekil E1.50. $R_h=\%30$, $Fo=11,8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

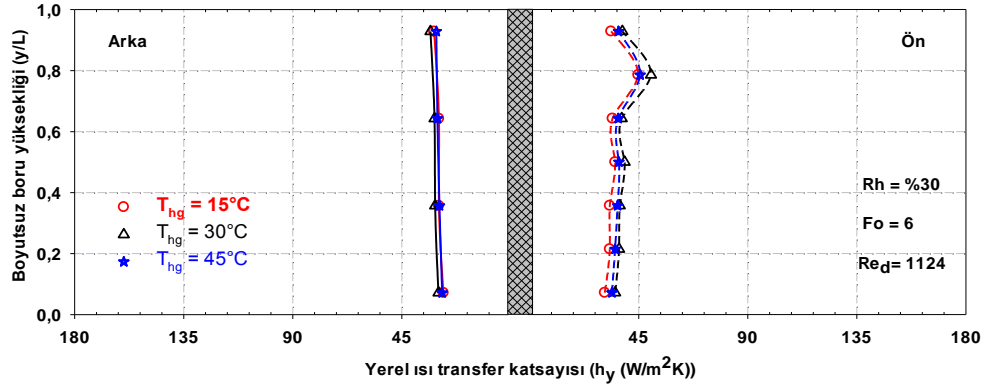


Şekil E1.51. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

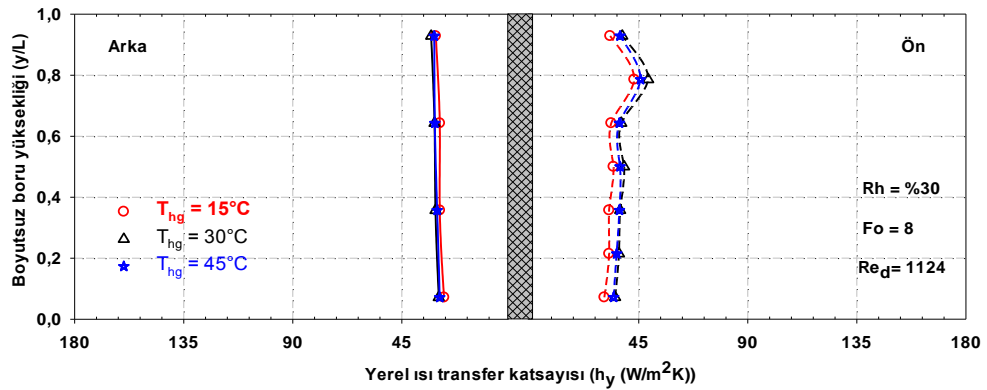
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.52. Rh=%30, Fo=3, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

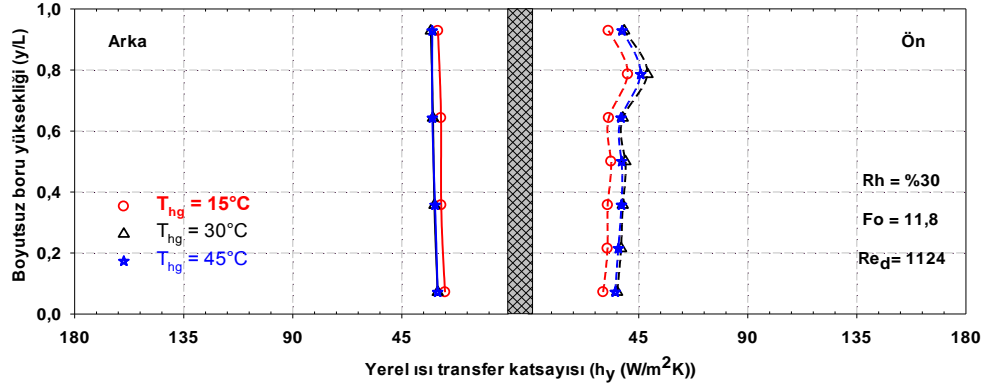


Şekil E1.53. Rh=%30, Fo=6, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

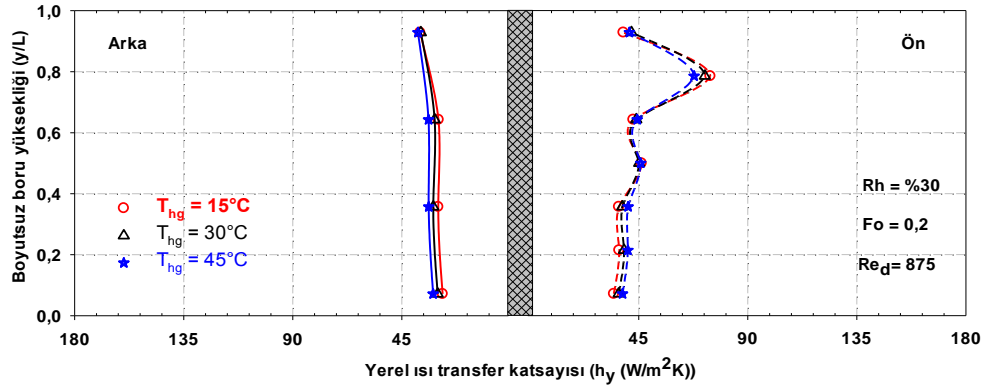


Şekil E1.54. Rh=%30, Fo=8, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

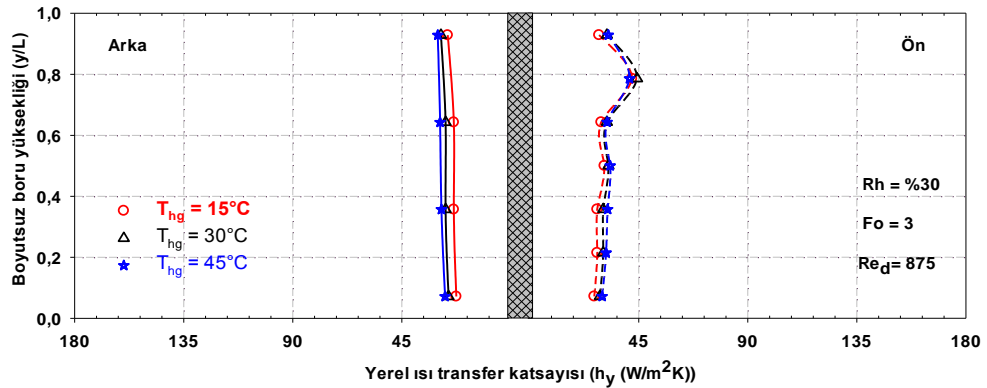
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.55. $R_h=\%30$, $Fo=11,8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

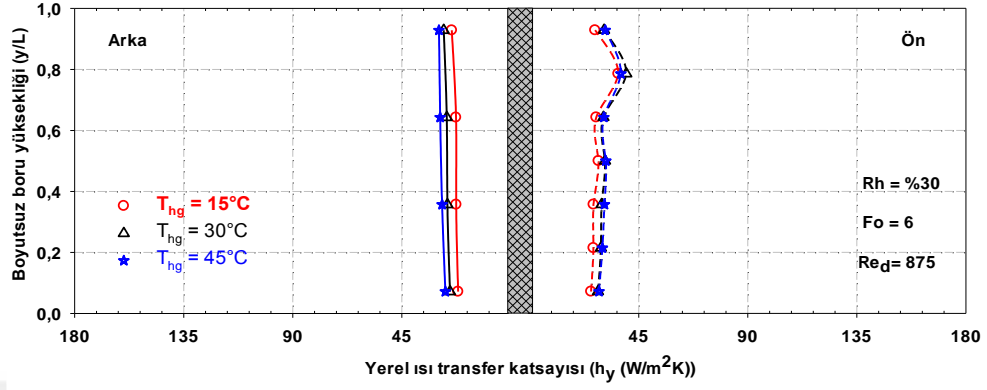


Şekil E1.56. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

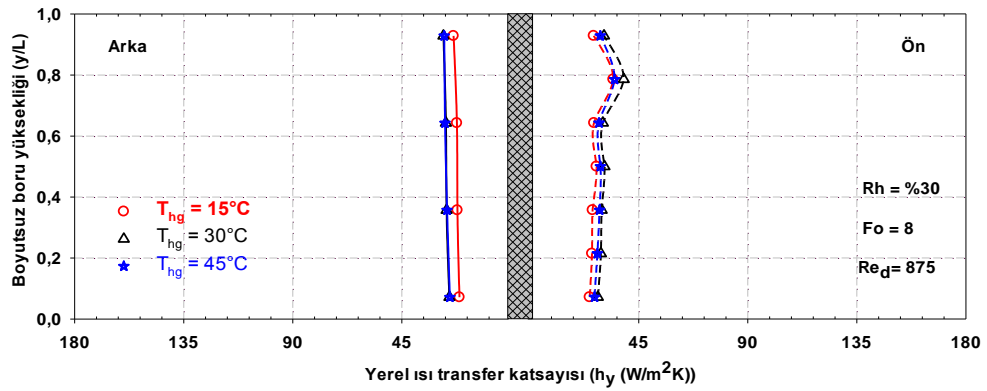


Şekil E1.57. $R_h=\%30$, $Fo=3$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

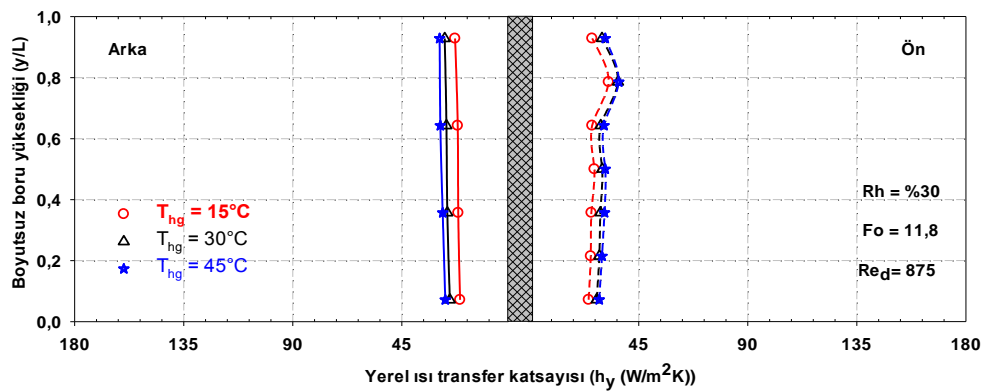
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.58. $R_h=\%30$, $Fo=6$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

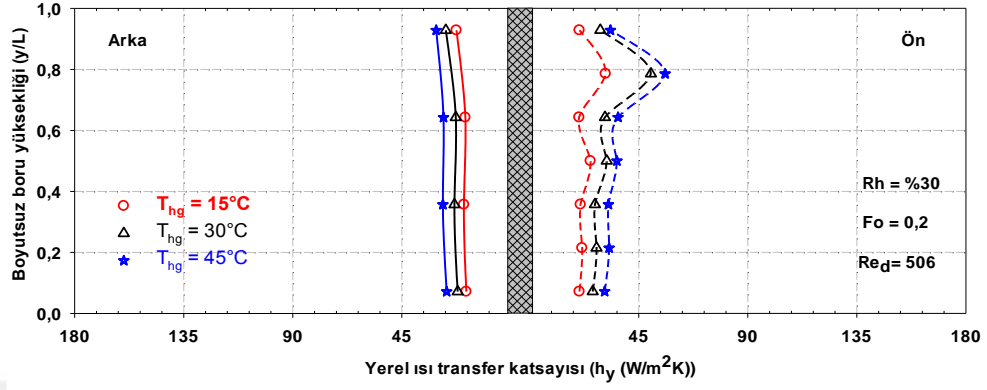


Şekil E1.59. $R_h=\%30$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

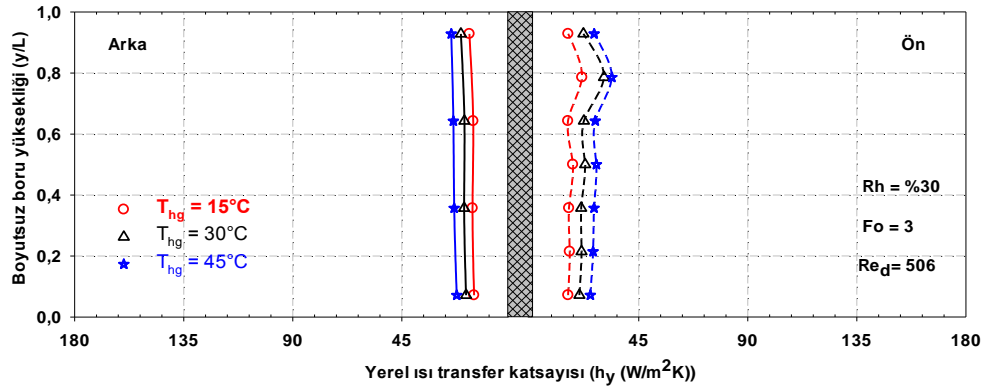


Şekil E1.60. $R_h=\%30$, $Fo=11,8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

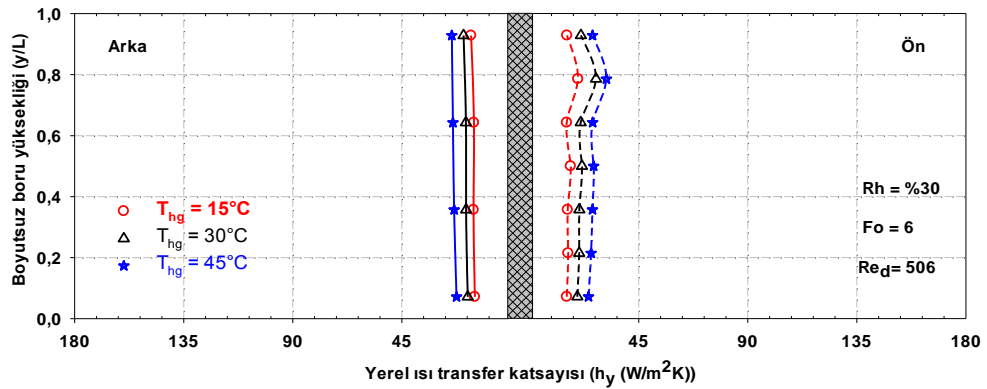
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.61. $R_h = \%30$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

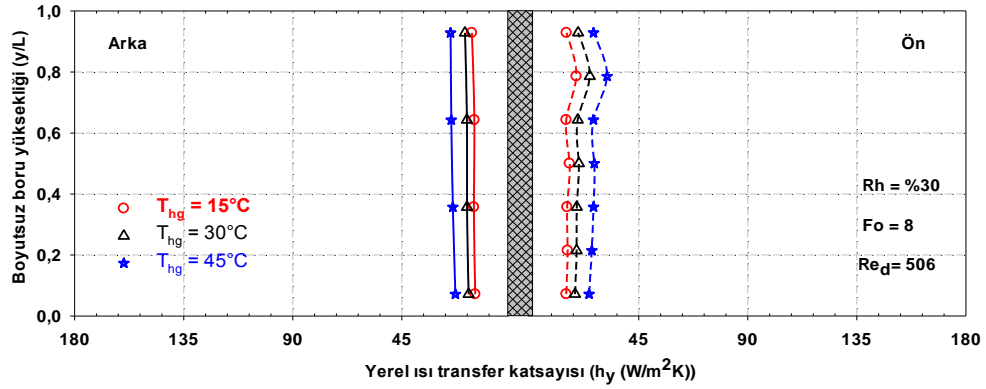


Şekil E1.62. $R_h = \%30$, $Fo = 3$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

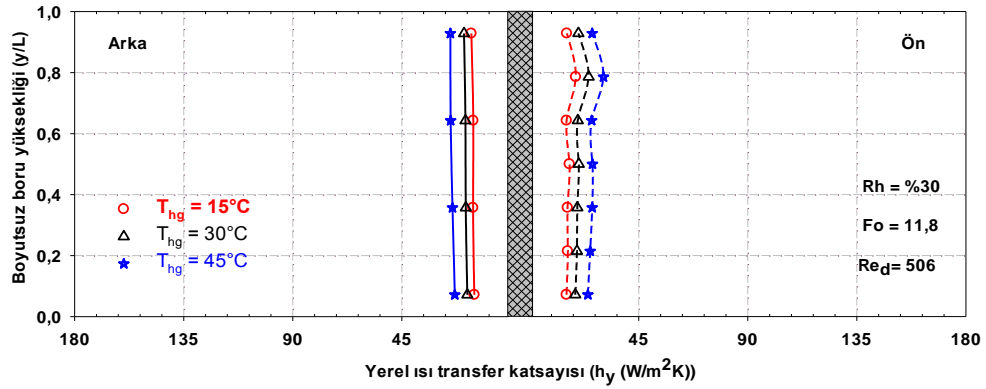


Şekil E1.63. $R_h = \%30$, $Fo = 6$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

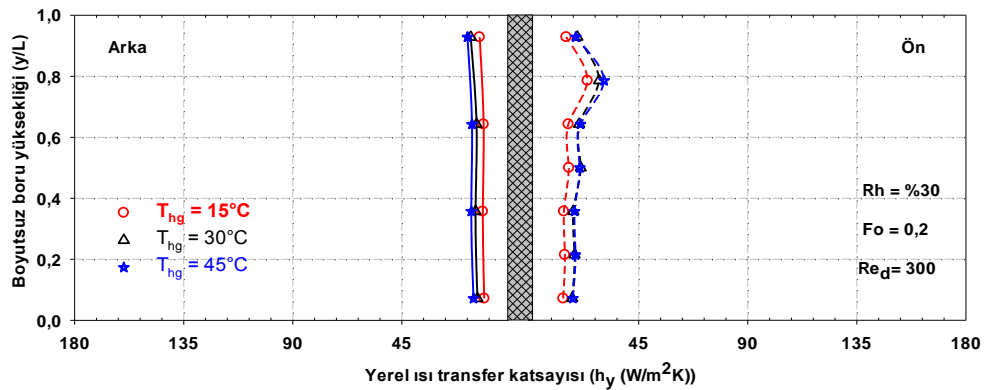
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.64. $R_h=\%30$, $Fo=8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

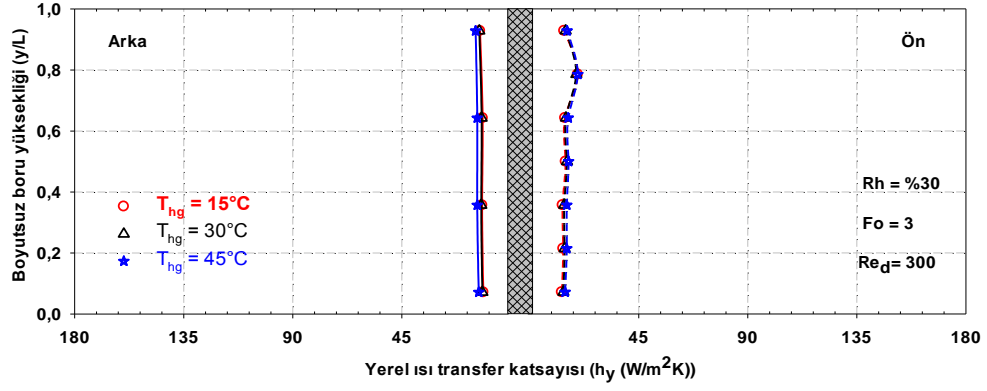


Şekil E1.65. $R_h=\%30$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

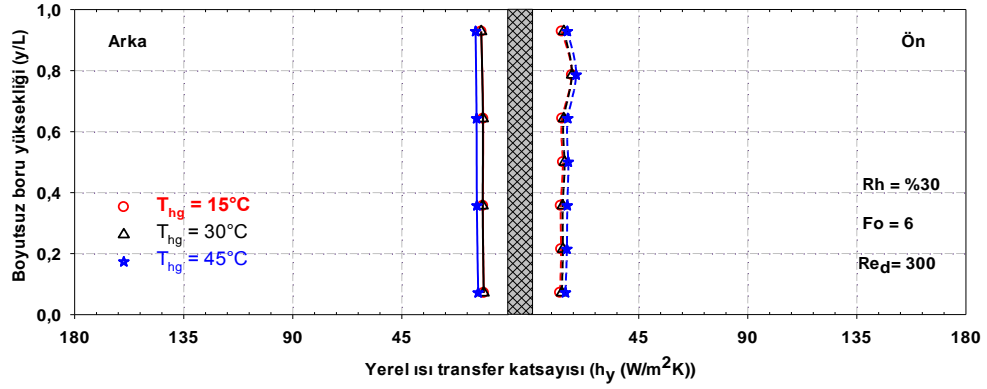


Şekil E1.66. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

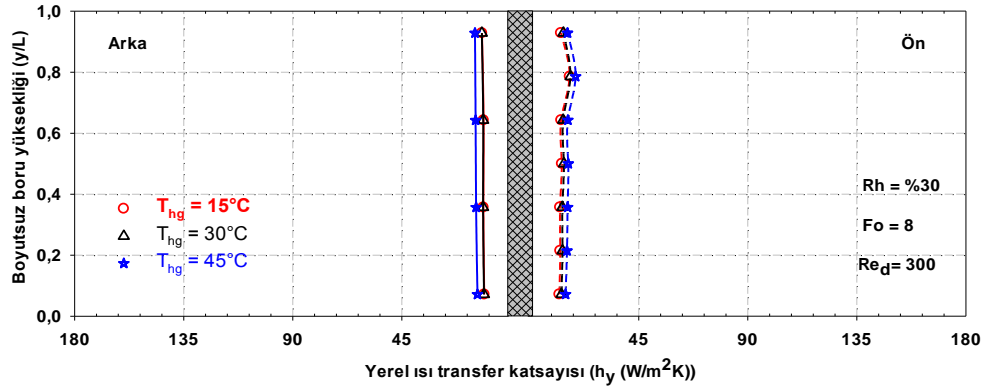
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.67. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

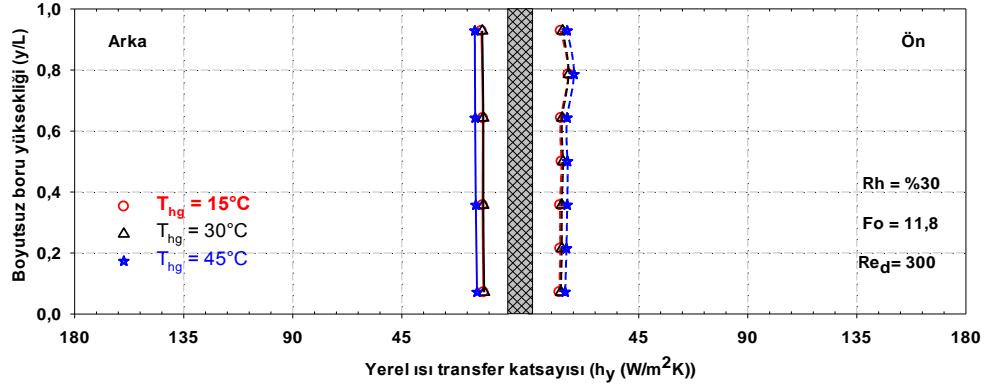


Şekil E1.68. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

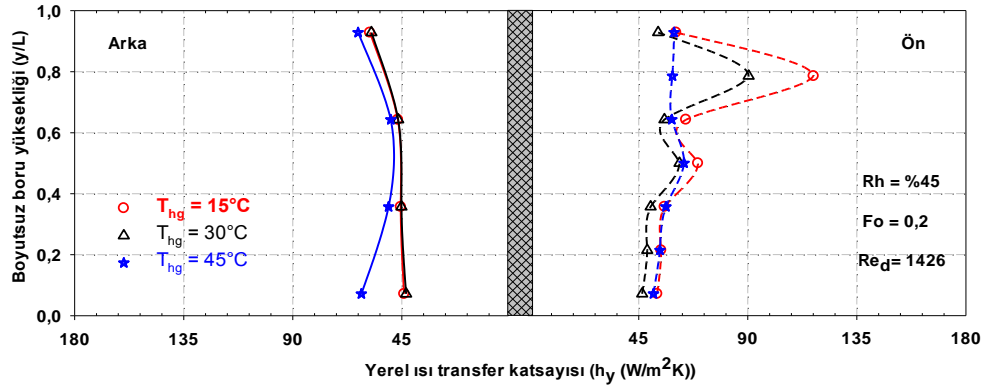


Şekil E1.69. $R_h=\%30$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

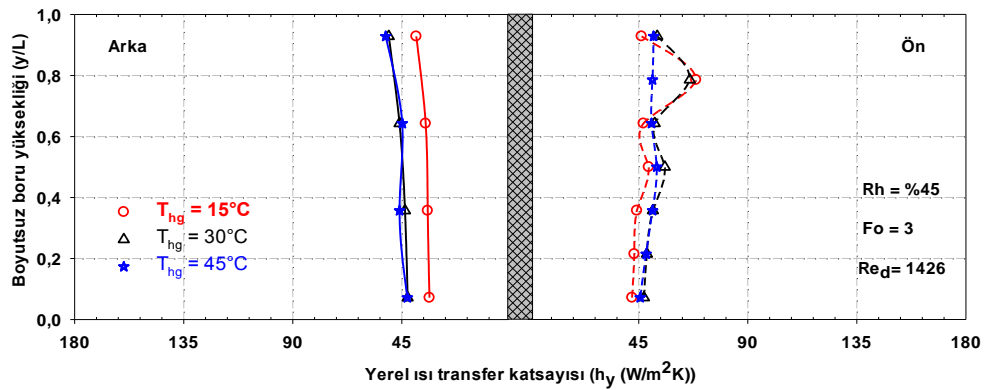
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.70. $R_h = \%30$, $Fo = 11,8$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

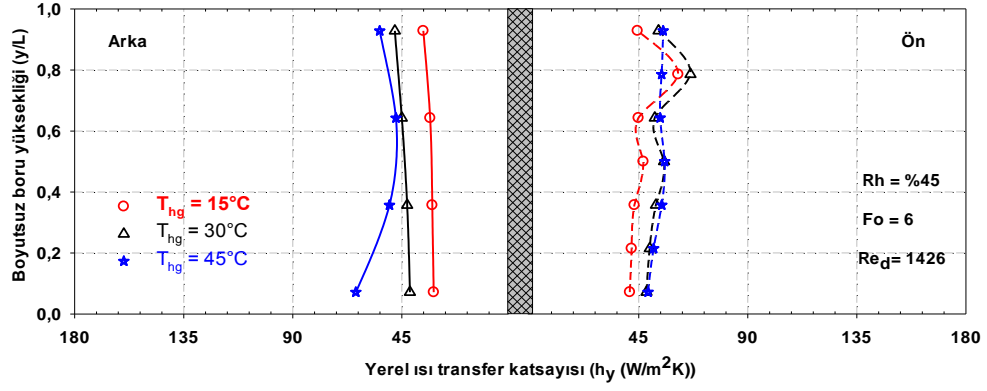


Şekil E1.71. $R_h = \%45$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

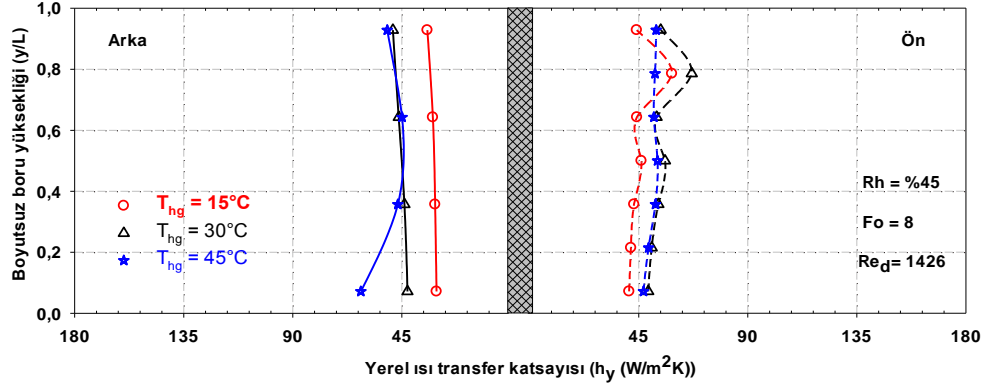


Şekil E1.72. $R_h = \%45$, $Fo = 3$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

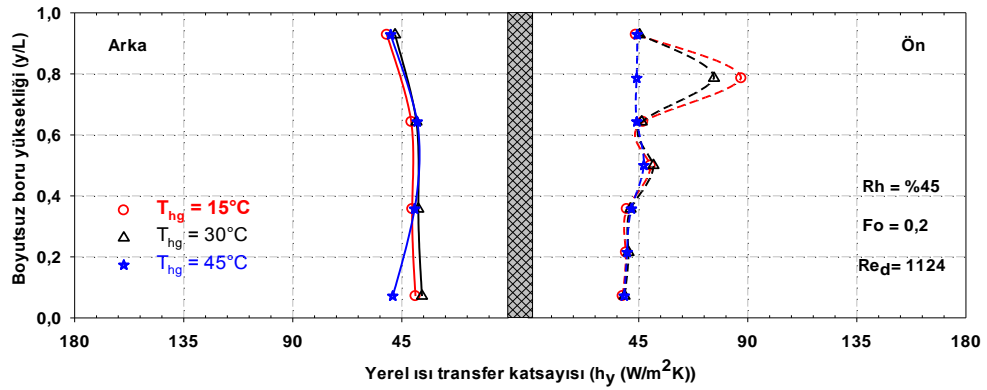
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.73. $R_h=\%45$, $Fo=6$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

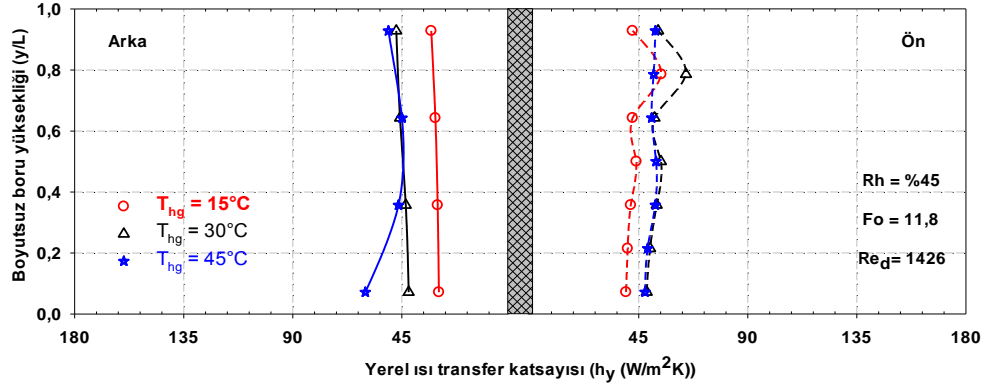


Şekil E1.74. $R_h=\%45$, $Fo=8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

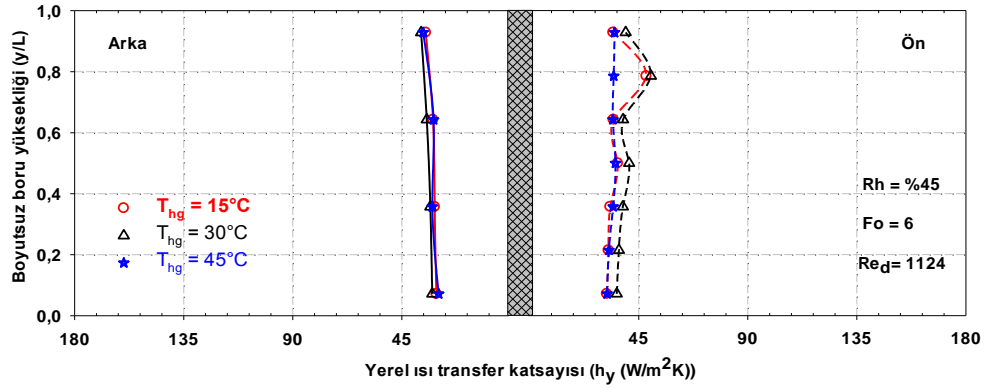


Şekil E1.75. $R_h=\%45$, $Fo=0,2$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

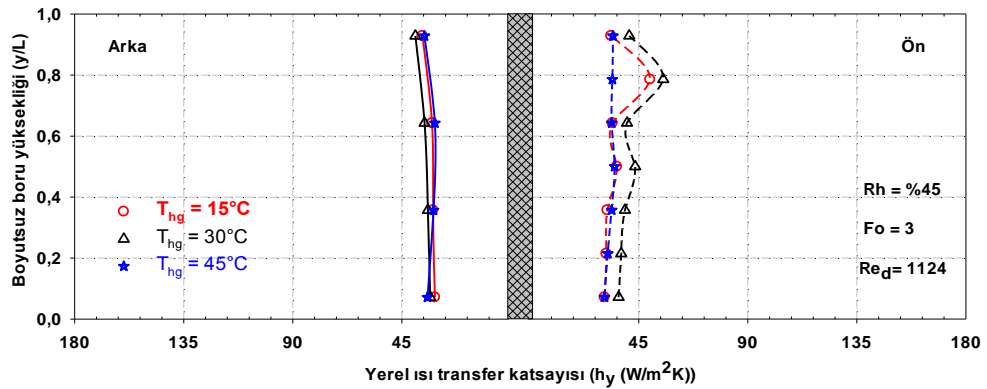
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.76. $R_h = \%45$, $Fo = 11,8$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

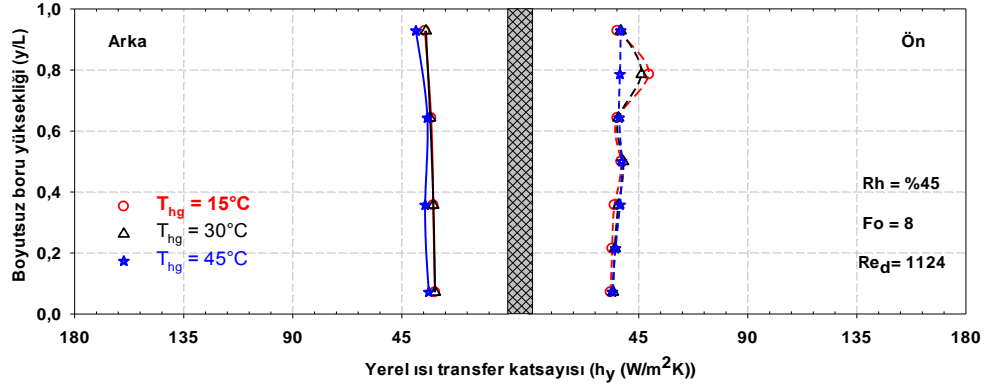


Şekil E1.77. $R_h = \%45$, $Fo = 6$, $Re_d = 1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

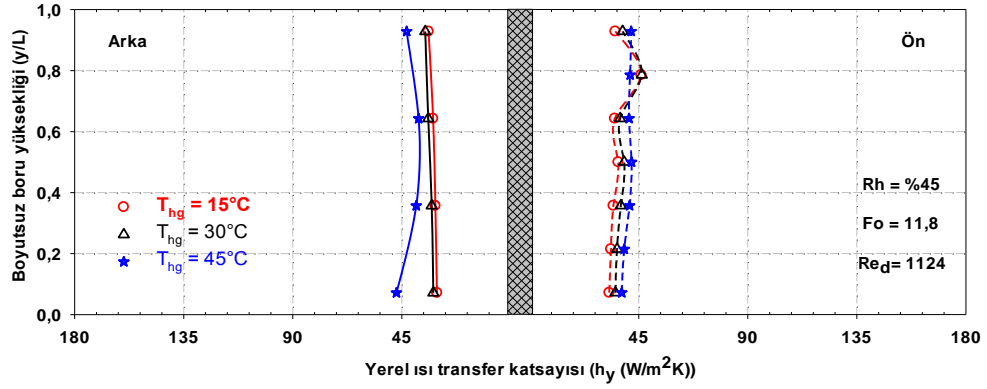


Şekil E1.78. $R_h = \%45$, $Fo = 3$, $Re_d = 1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

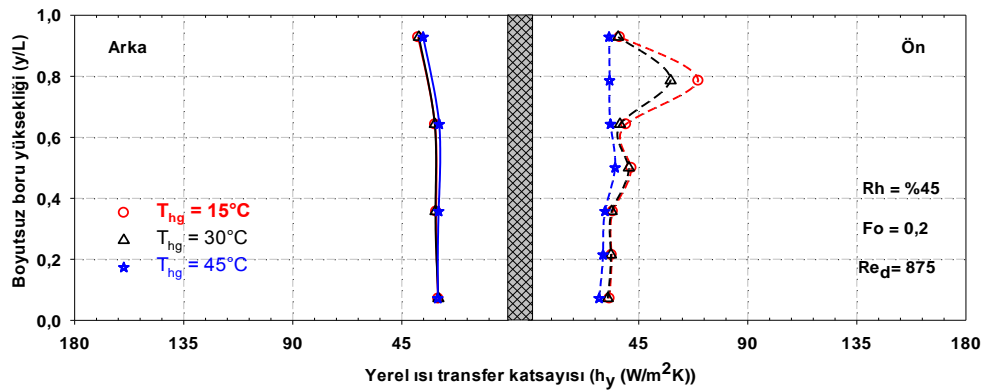
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.79. Rh=%45, Fo=8, Red=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

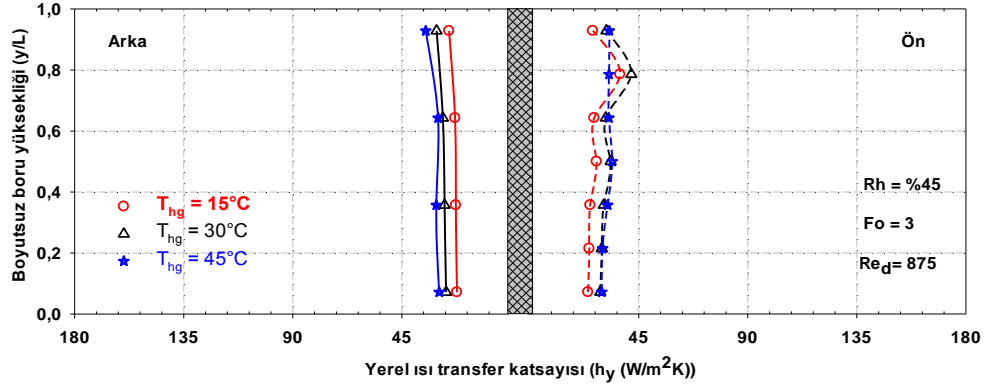


Şekil E1.80. Rh=%45, Fo=11,8, Red=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

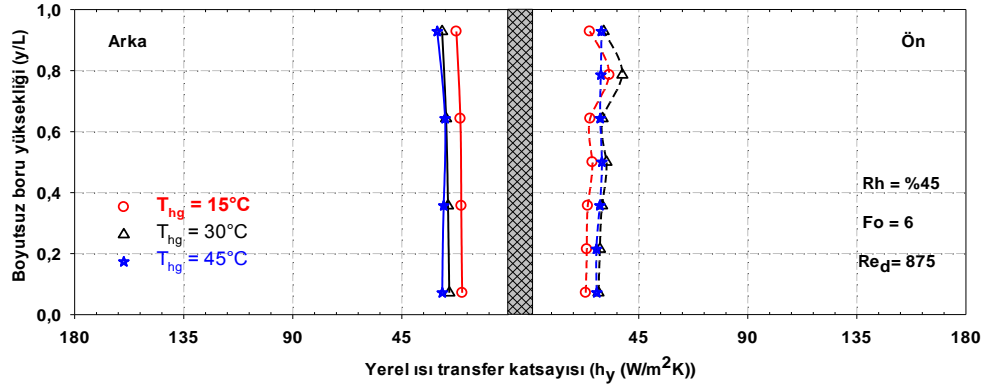


Şekil E1.81. Rh=%45, Fo=0,2, Red=875 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

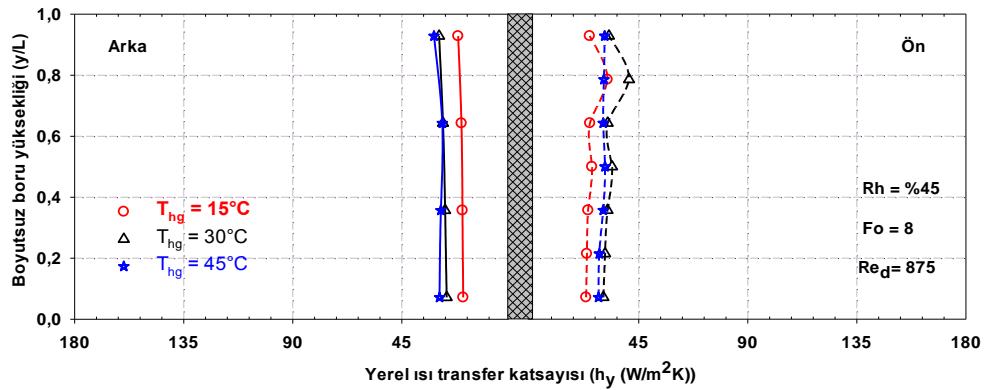
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.82. $R_h=\%45$, $Fo=3$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

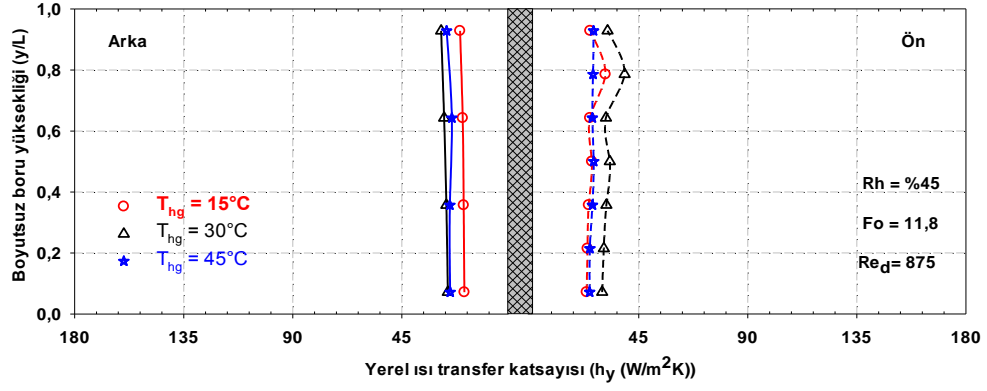


Şekil E1.83. $R_h=\%45$, $Fo=6$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

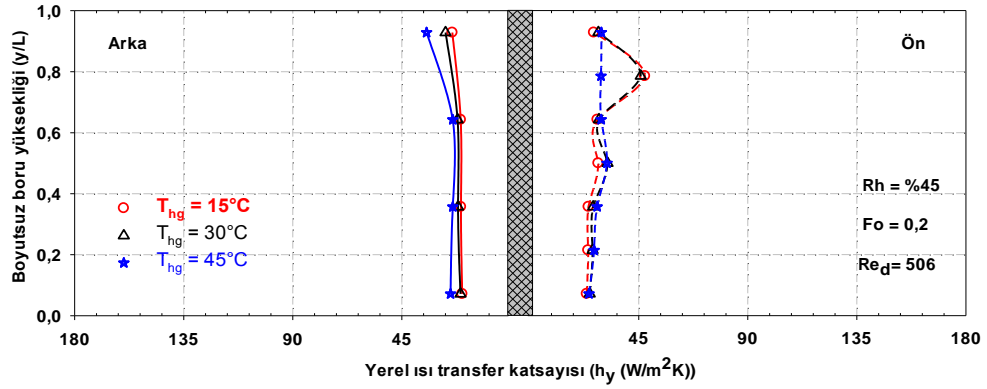


Şekil E1.84. $R_h=\%45$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

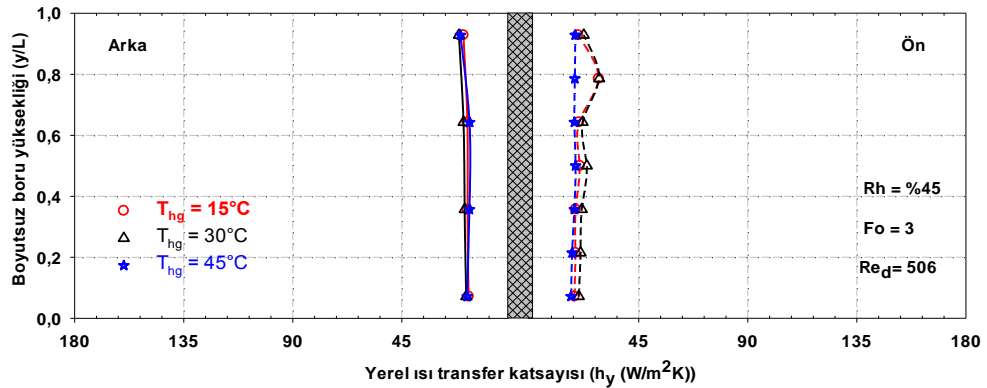
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.85. $R_h = \%45$, $Fo = 11,8$, $Re_d = 875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

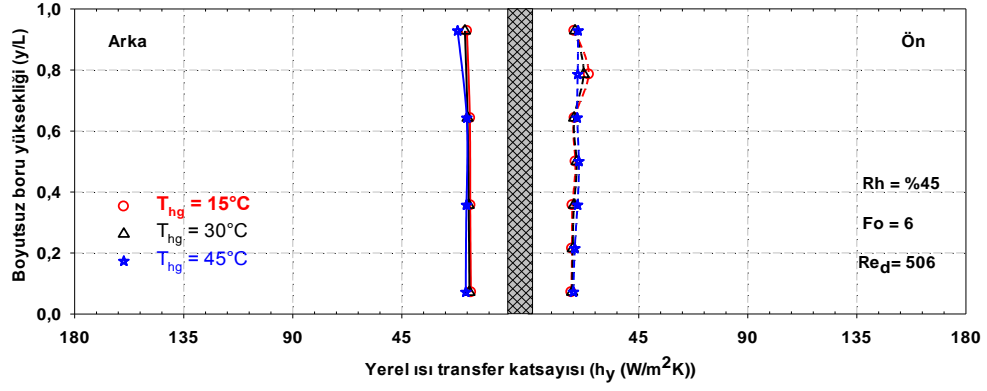


Şekil E1.86. $R_h = \%45$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

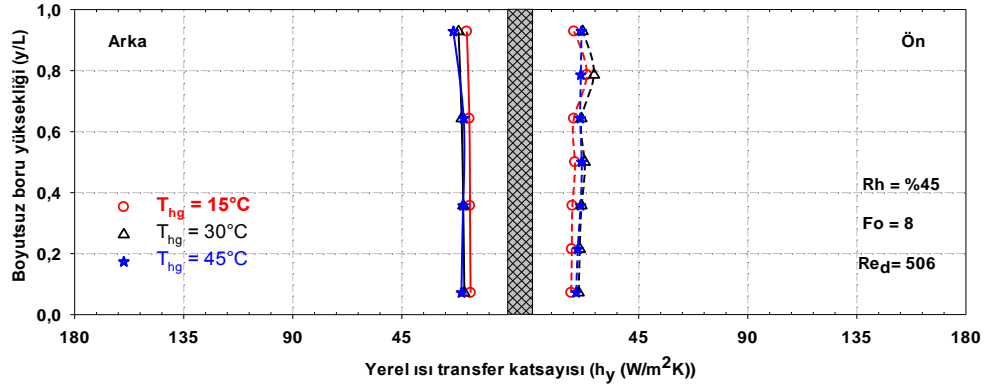


Şekil E1.87. $R_h = \%45$, $Fo = 3$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

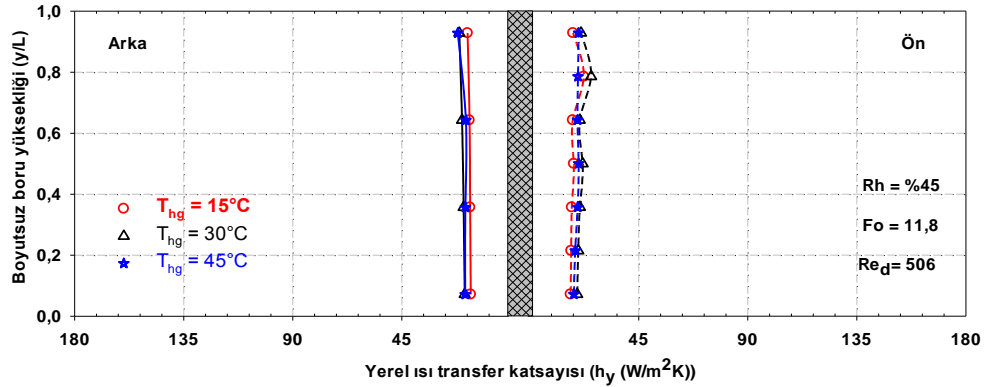
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.88. $R_h=\%45$, $Fo=6$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

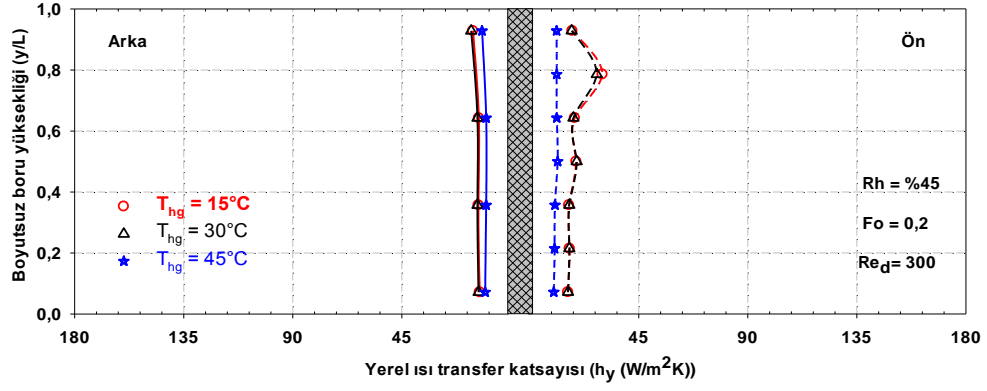


Şekil E1.89. $R_h=\%45$, $Fo=8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

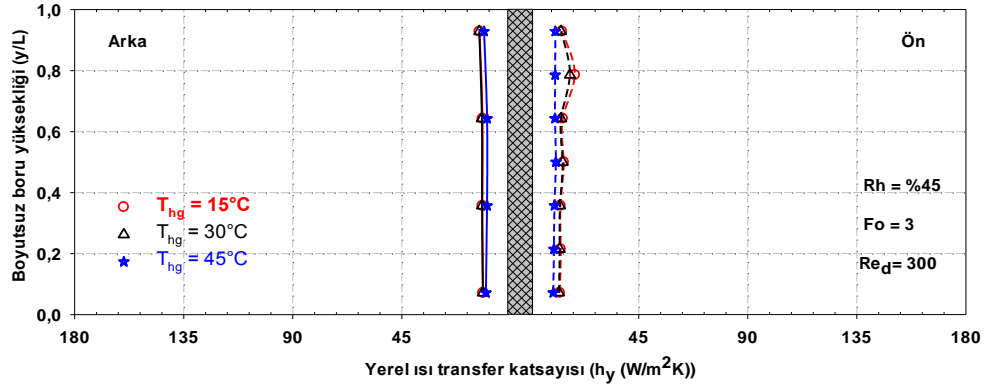


Şekil E1.90. $R_h=\%45$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

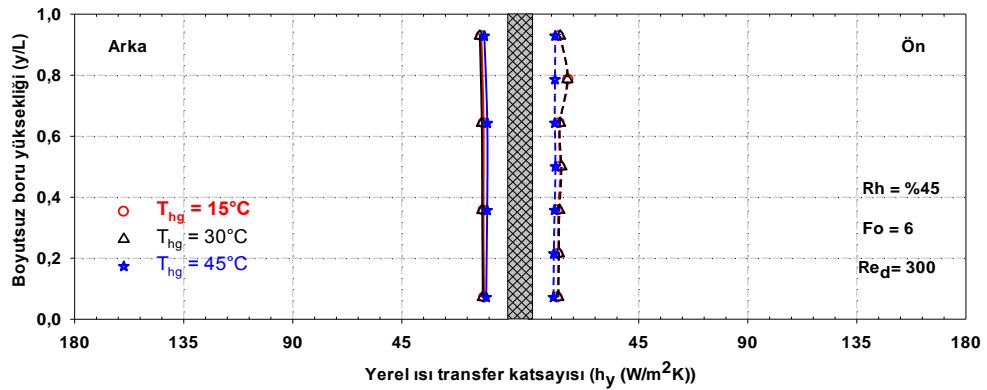
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.91. $R_h = \%45$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

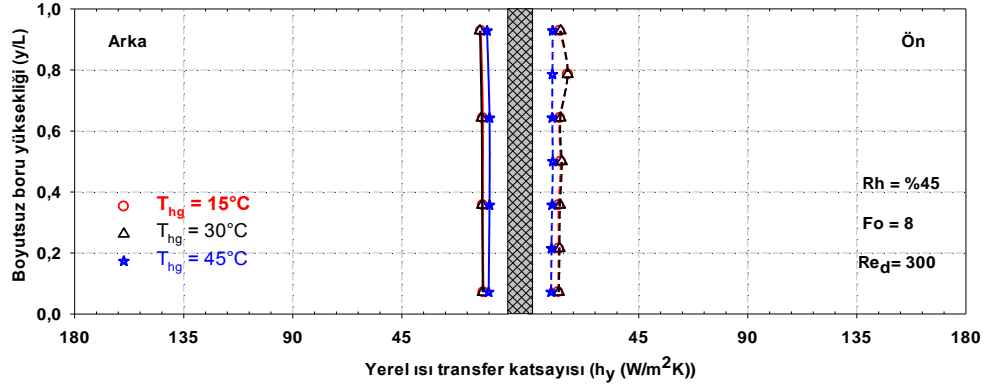


Şekil E1.92. $R_h = \%45$, $Fo = 3$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

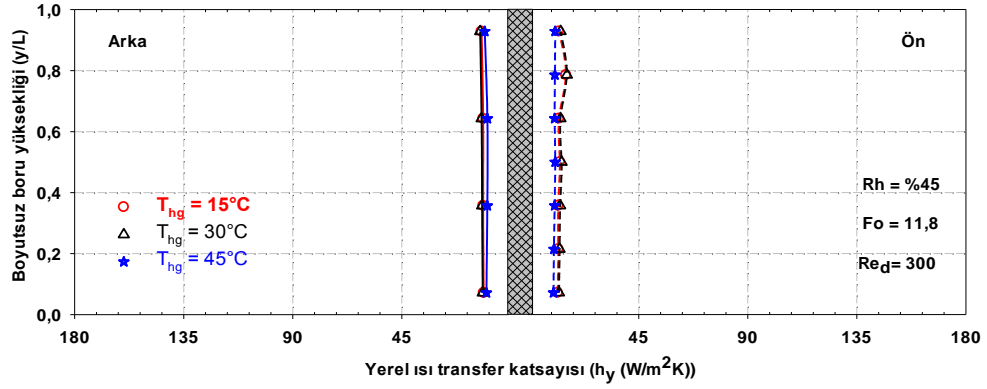


Şekil E1.93. $R_h = \%45$, $Fo = 6$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

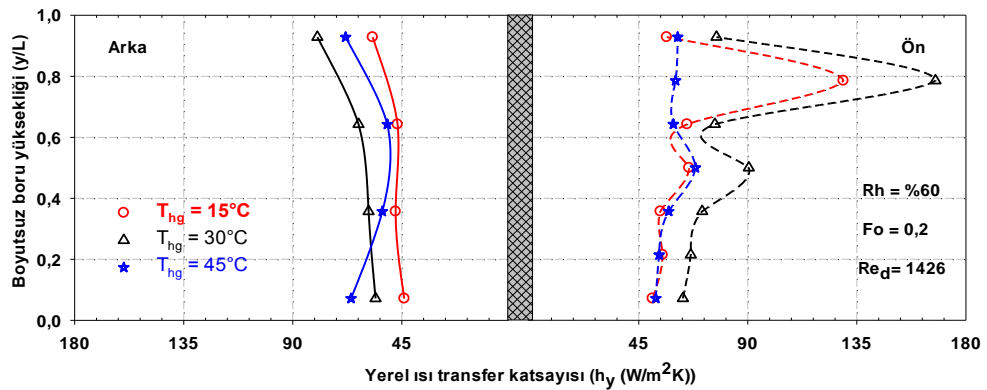
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.94. $R_h = \%45$, $Fo = 8$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

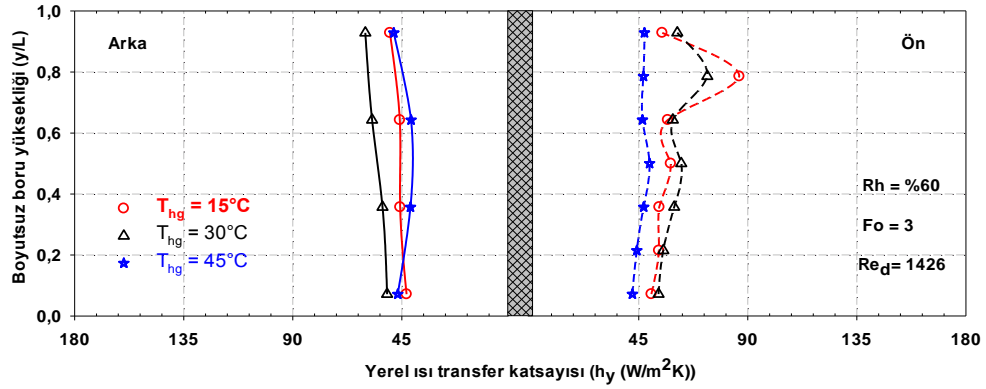


Şekil E1.95. $R_h = \%45$, $Fo = 11,8$, $Re_d = 300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

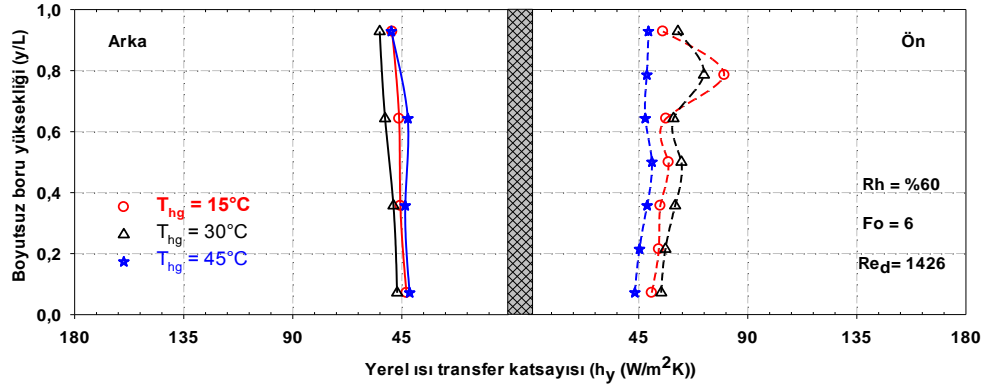


Şekil E1.96. $R_h = \%60$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

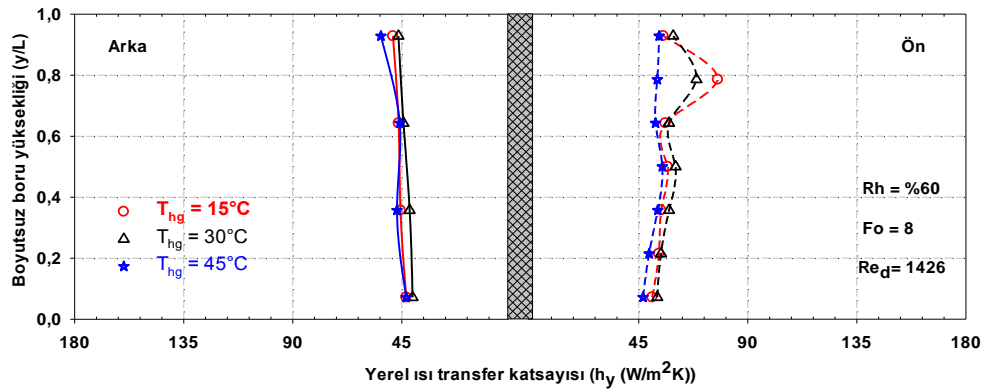
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.97. $R_h = \%60$, $Fo = 3$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

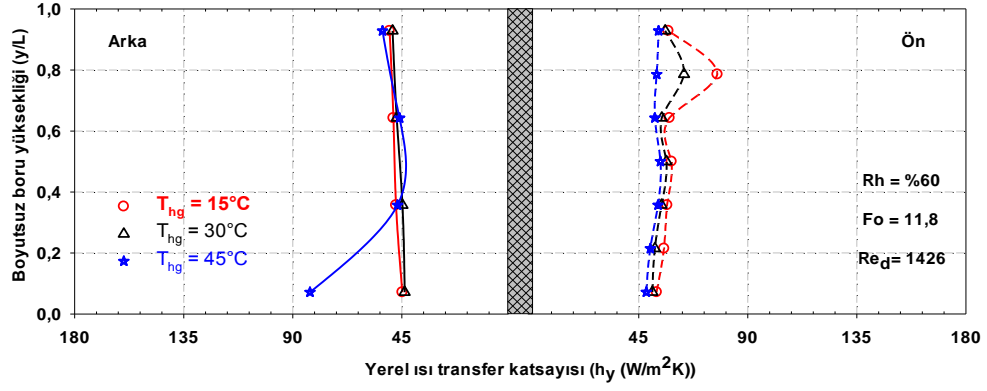


Şekil E1.98. $R_h = \%60$, $Fo = 6$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

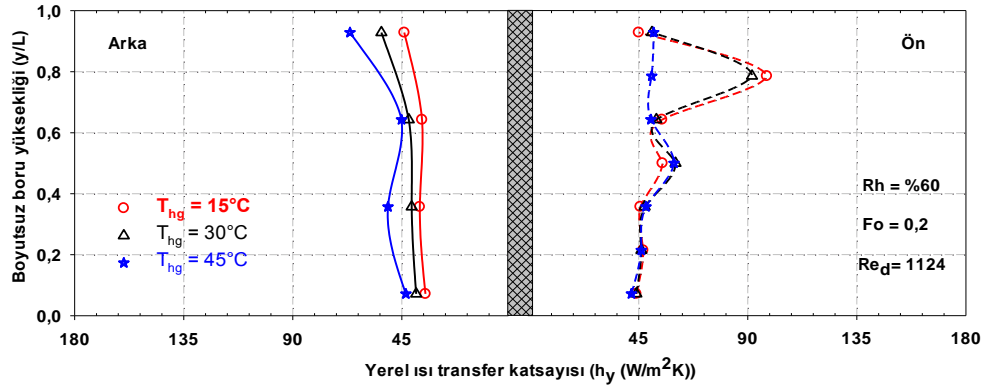


Şekil E1.99. $R_h = \%60$, $Fo = 8$, $Re_d = 1426$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

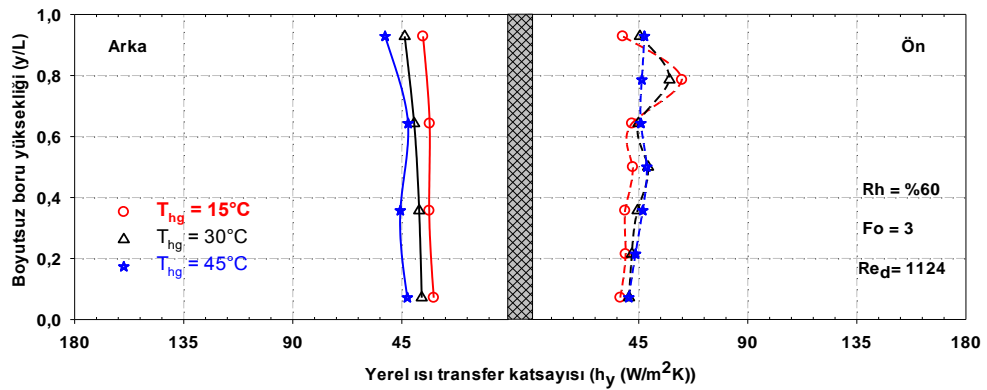
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.100. Rh=%60, Fo=11,8, Re_d=1426 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

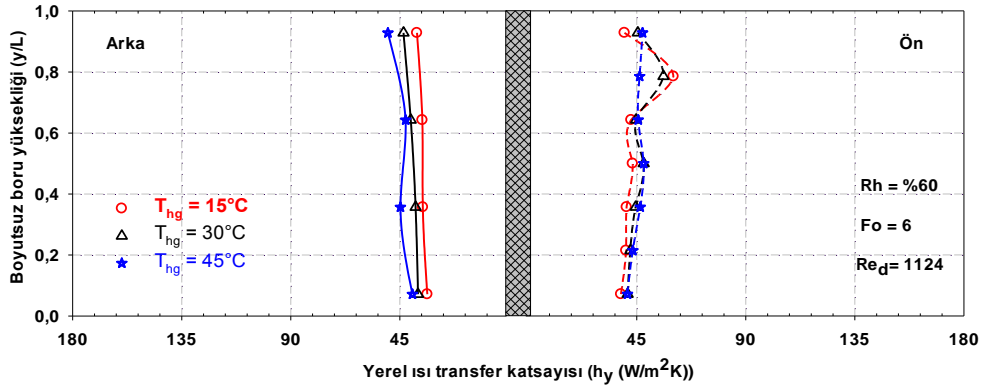


Şekil E1.101. Rh=%60, Fo=0,2, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

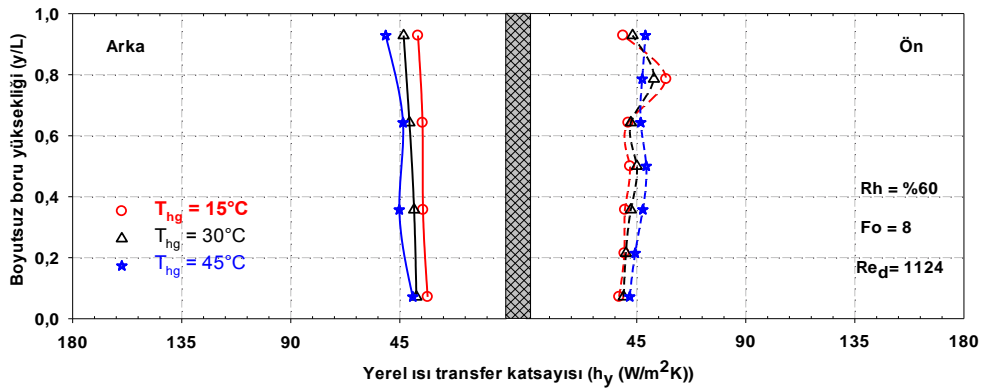


Şekil E1.102. Rh=%60, Fo=3, Re_d=1124 için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

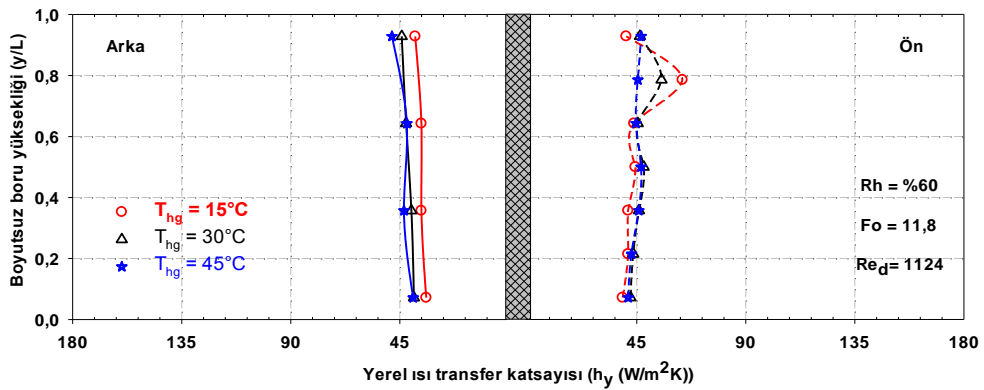
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.103. $R_h = \%60$, $Fo = 6$, $Re_d = 1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

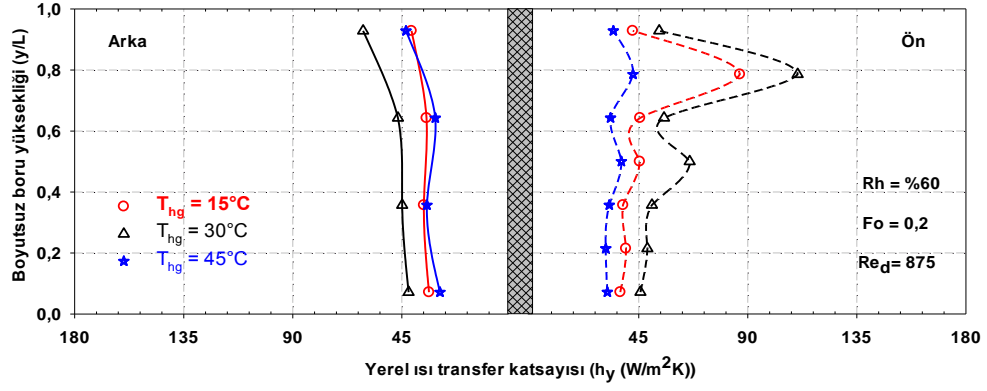


Şekil E1.104. $R_h = \%60$, $Fo = 8$, $Re_d = 1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

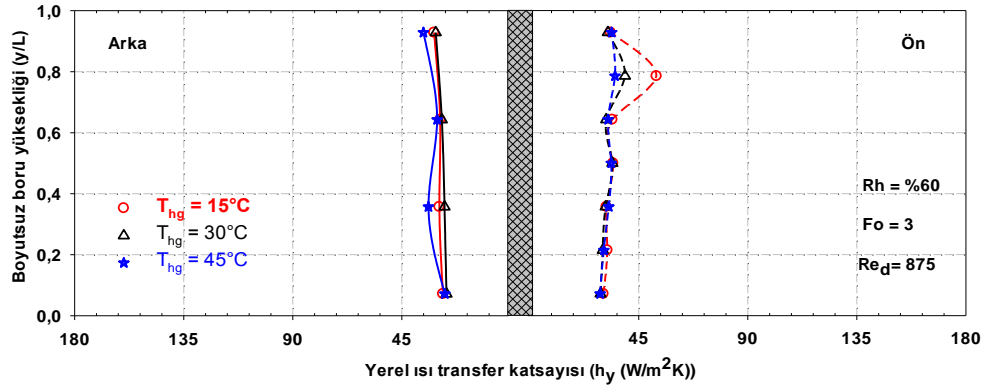


Şekil E1.105. $R_h = \%60$, $Fo = 11,8$, $Re_d = 1124$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

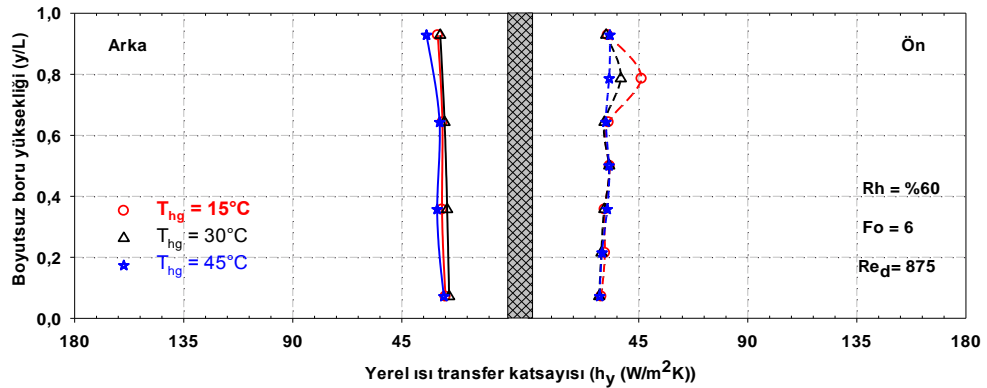
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.106. $R_h = \%60$, $Fo = 0,2$, $Re_d = 875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

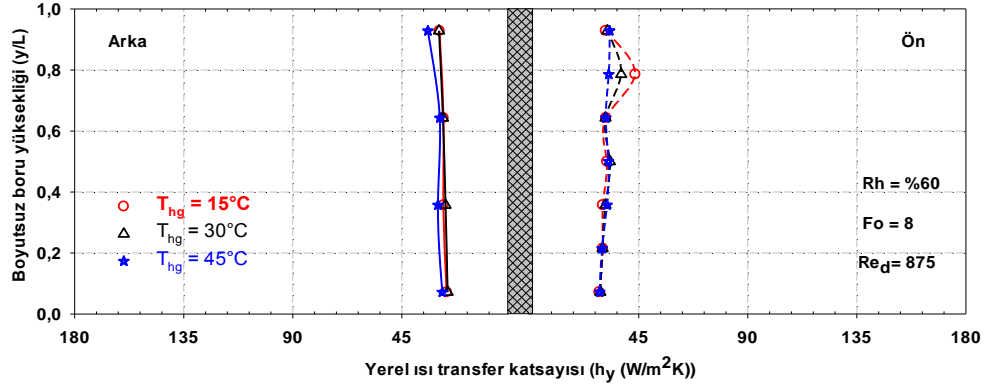


Şekil E1.107. $R_h = \%60$, $Fo = 3$, $Re_d = 875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

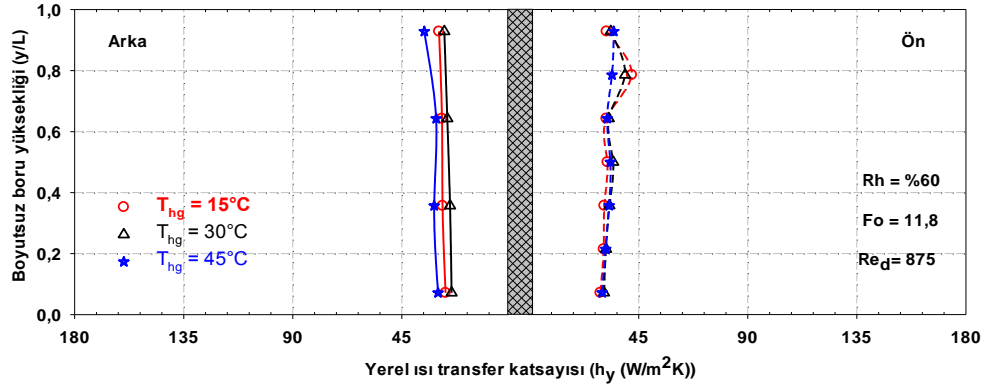


Şekil E1.108. $R_h = \%60$, $Fo = 6$, $Re_d = 875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

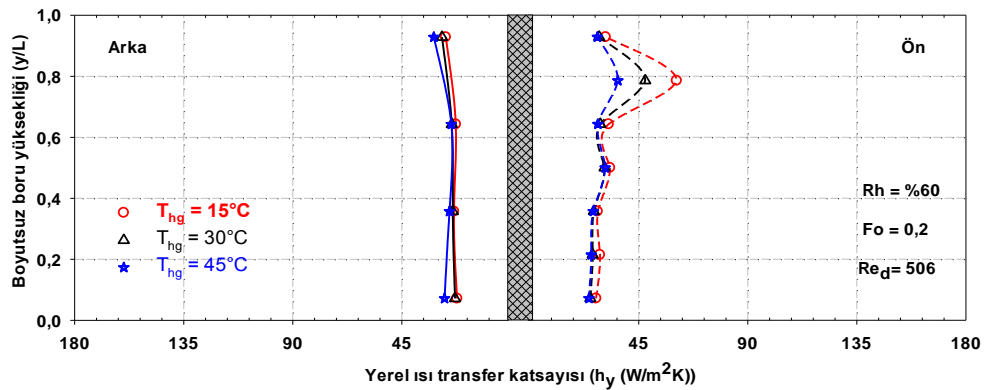
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.109. $R_h=\%60$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

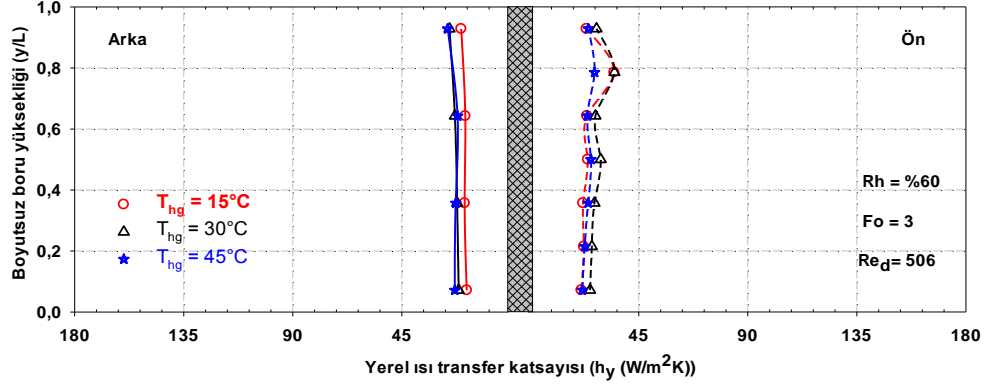


Şekil E1.110. $R_h=\%60$, $Fo=11,8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

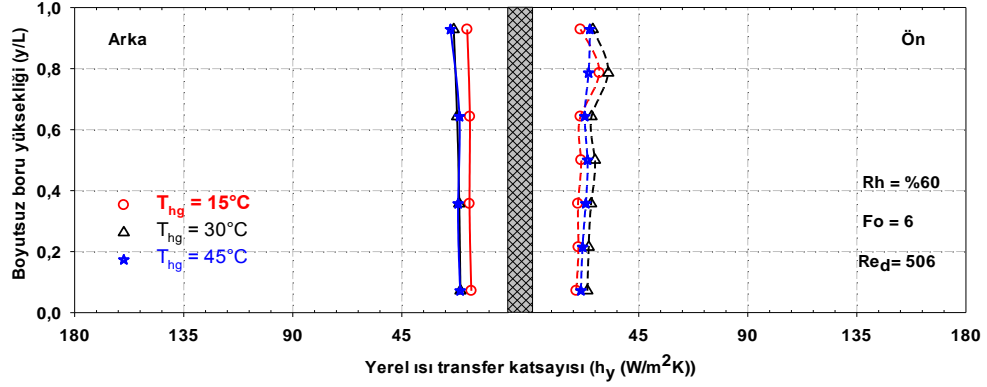


Şekil E1.111. $R_h=\%60$, $Fo=0,2$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

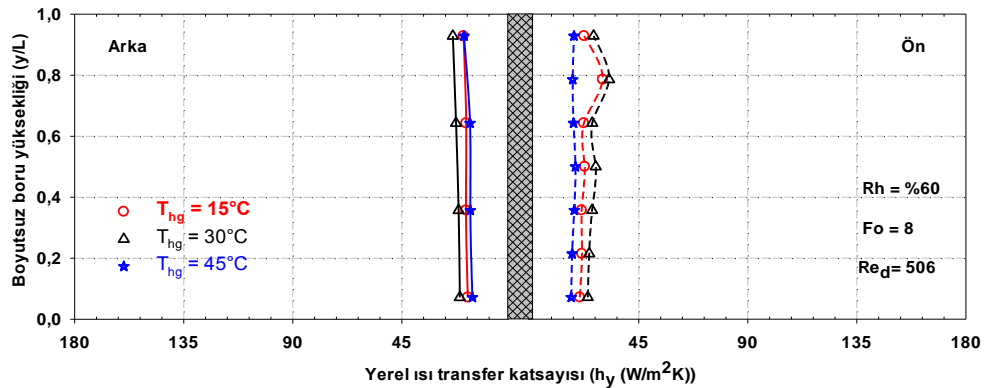
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.112. $R_h = \%60$, $Fo = 3$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

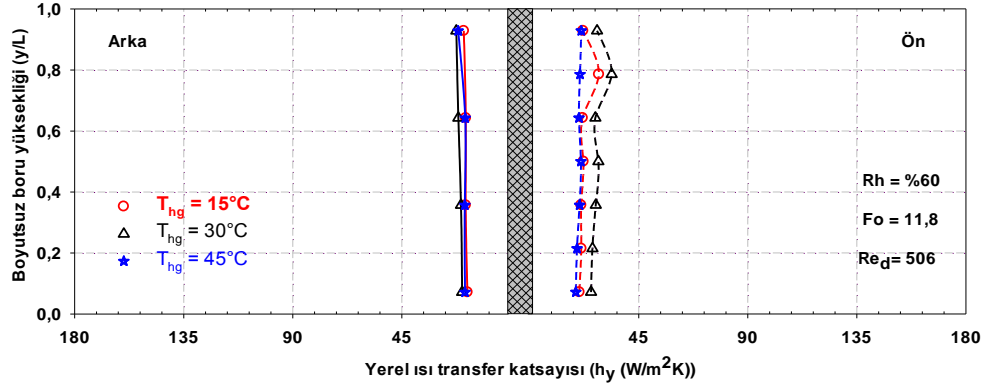


Şekil E1.113. $R_h = \%60$, $Fo = 6$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

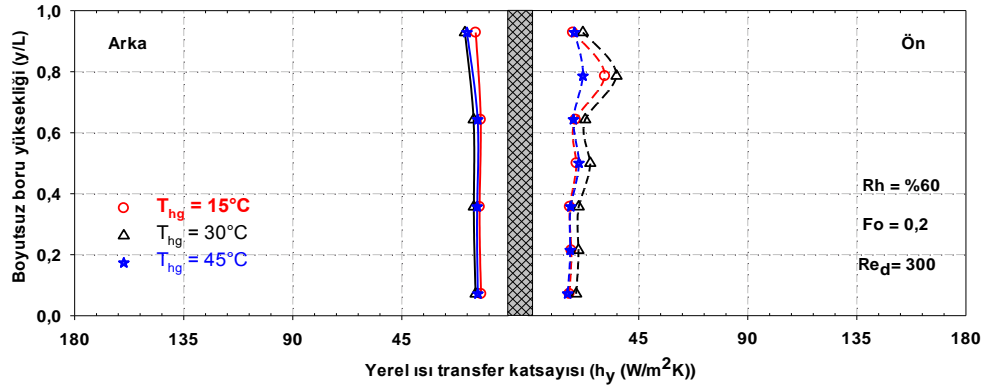


Şekil E1.114. $R_h = \%60$, $Fo = 8$, $Re_d = 506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

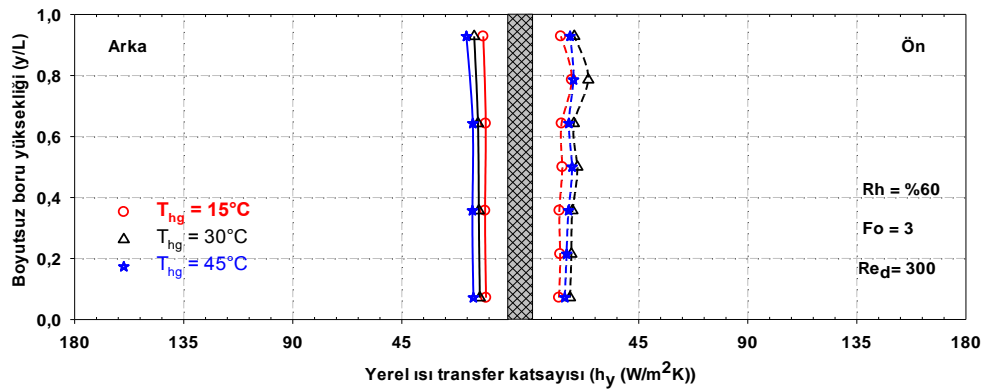
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.115. $R_h=\%60$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

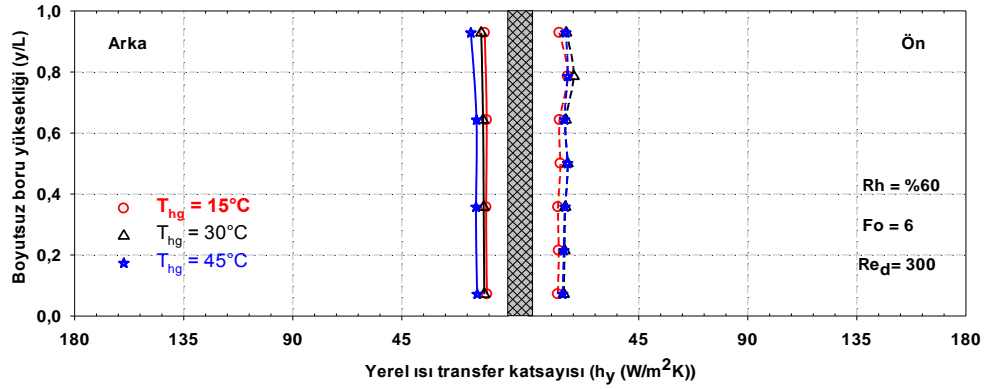


Şekil E1.116. $R_h=\%60$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

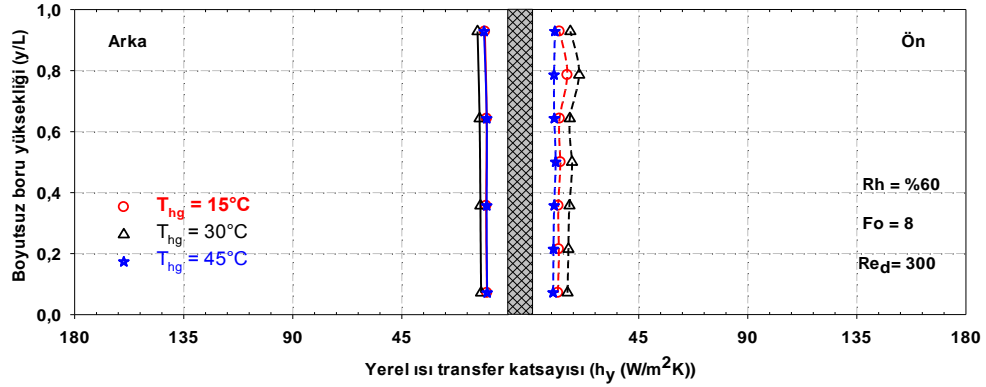


Şekil E1.117. $R_h=\%60$, $Fo=3$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

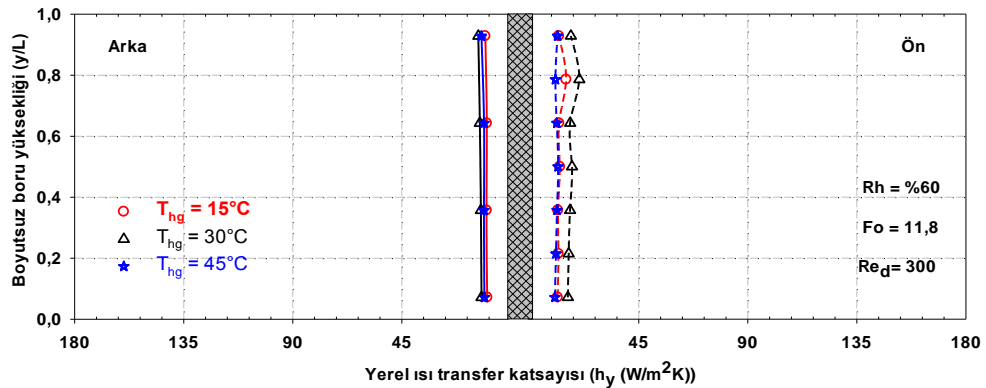
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.118. $R_h=\%60$, $Fo=6$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

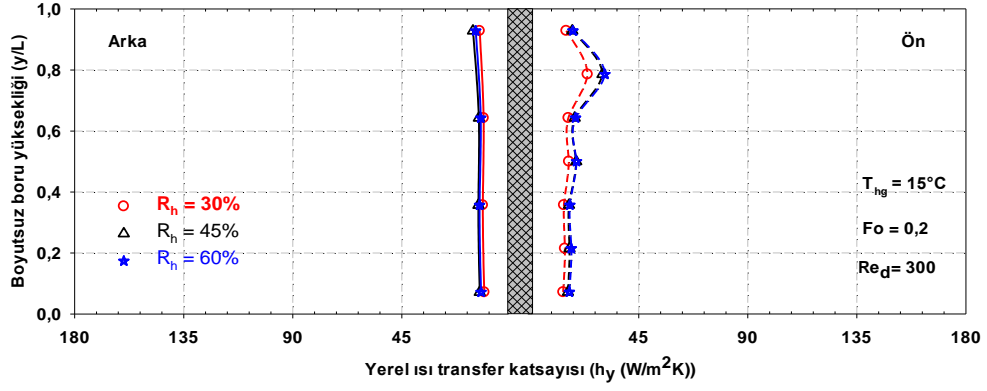


Şekil E1.119. $R_h=\%60$, $Fo=8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

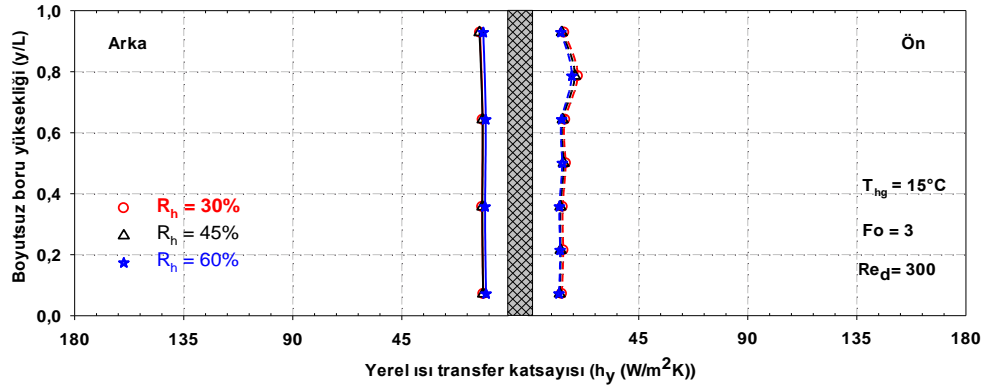


Şekil E1.120. $R_h=\%60$, $Fo=11,8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının T_{hg} 'ye göre değişimi

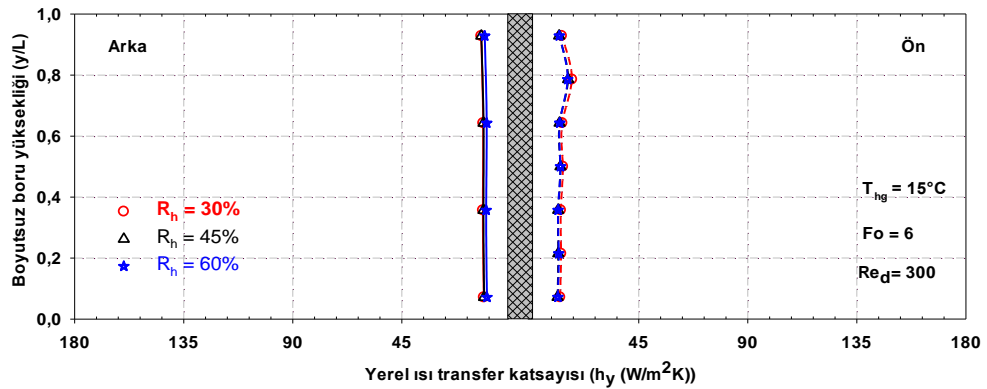
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.121. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_n 'ye göre değişimi

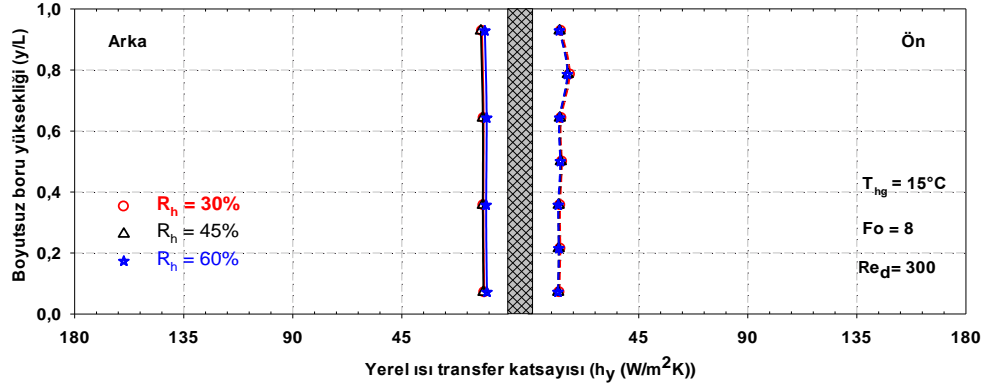


Şekil E1.122. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_n 'ye göre değişimi

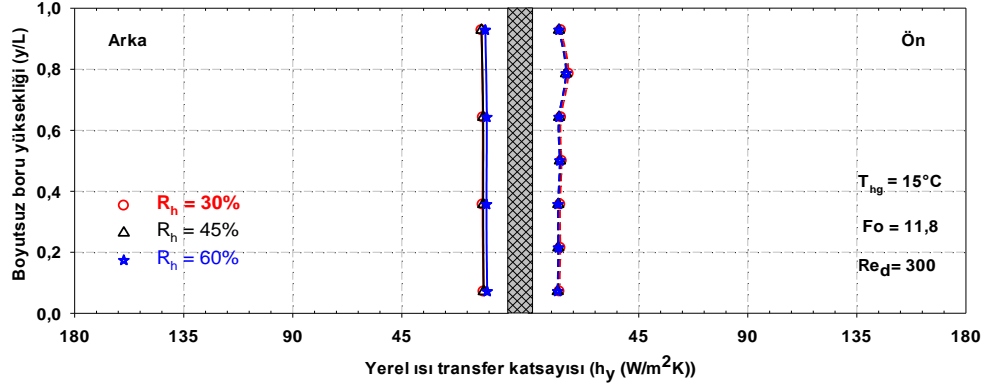


Şekil E1.123. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_n 'ye göre değişimi

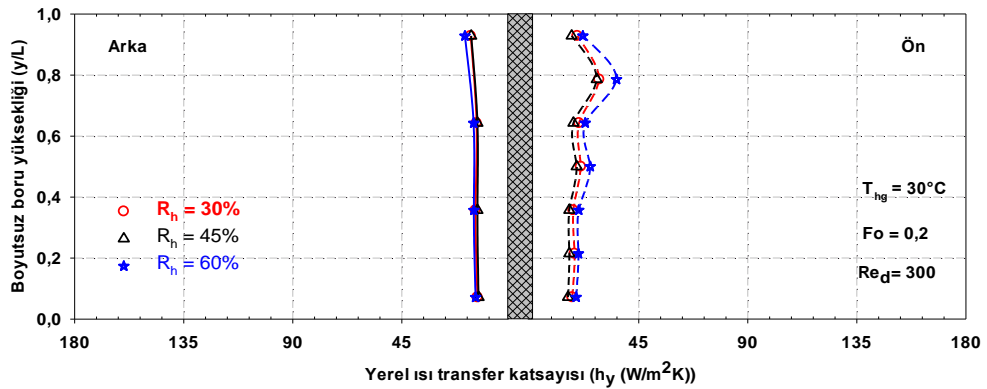
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.124. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

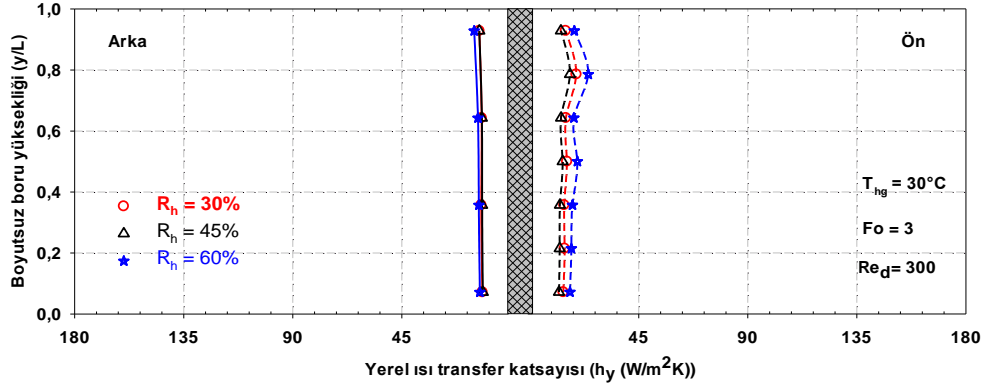


Şekil E1.125. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=11,8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

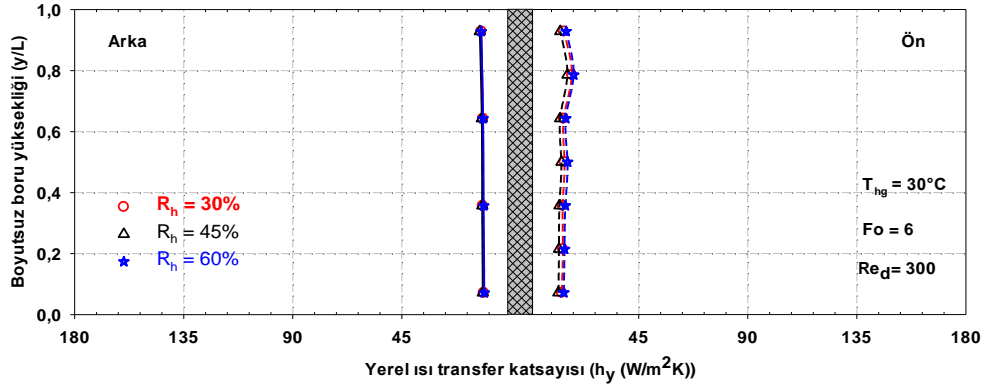


Şekil E1.126. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

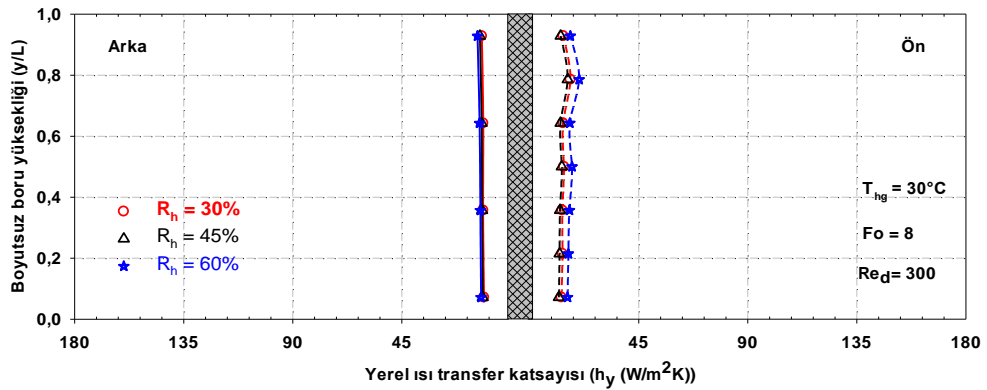
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.127. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

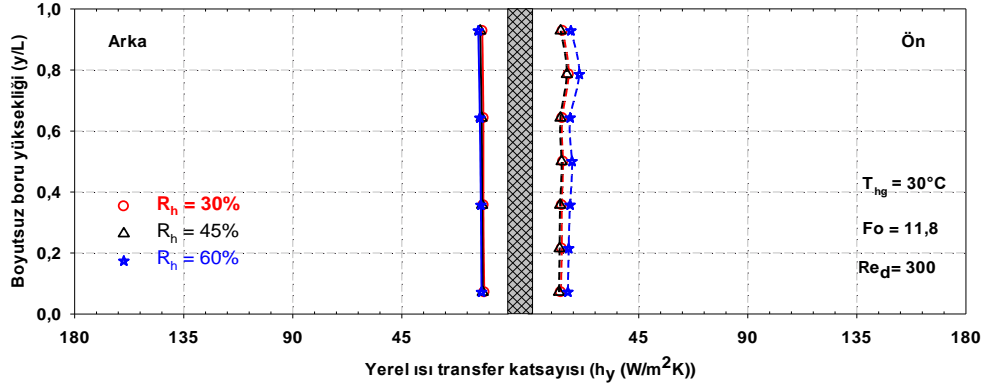


Şekil E1.128. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

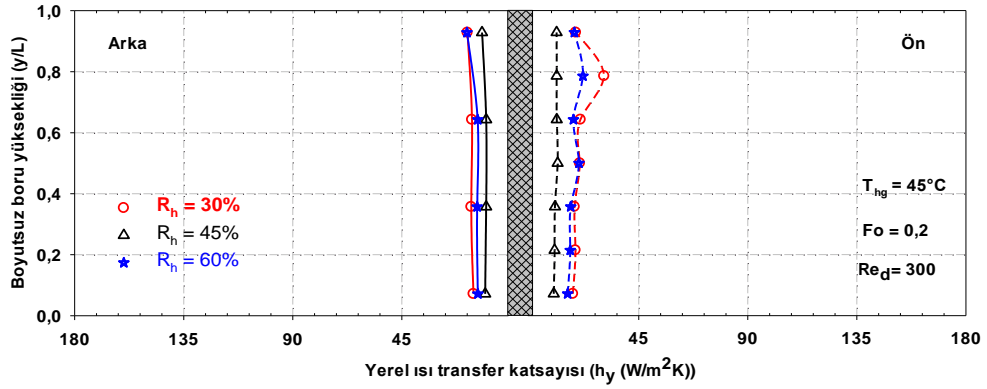


Şekil E1.129. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

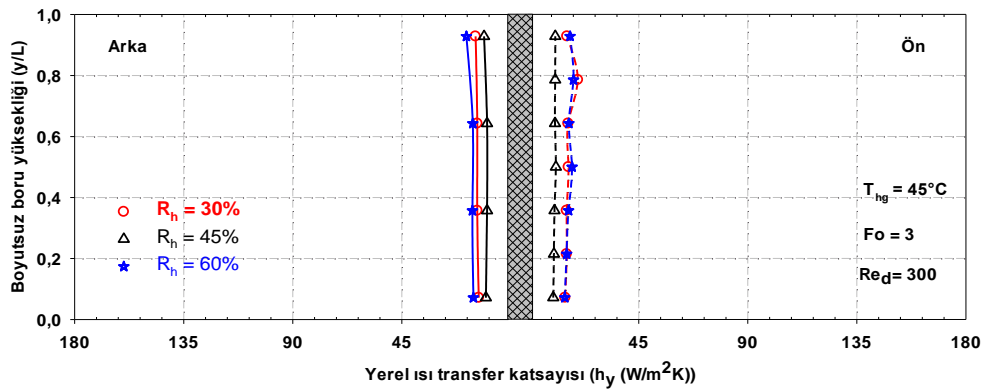
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.130. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

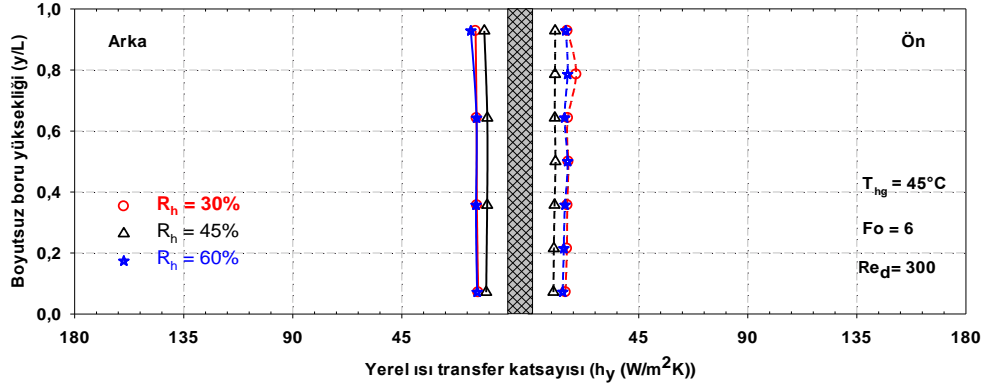


Şekil E1.131. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

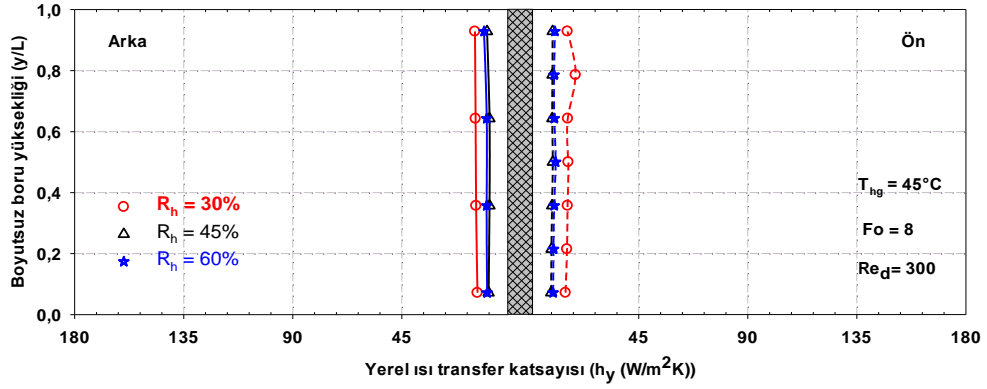


Şekil E1.132. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

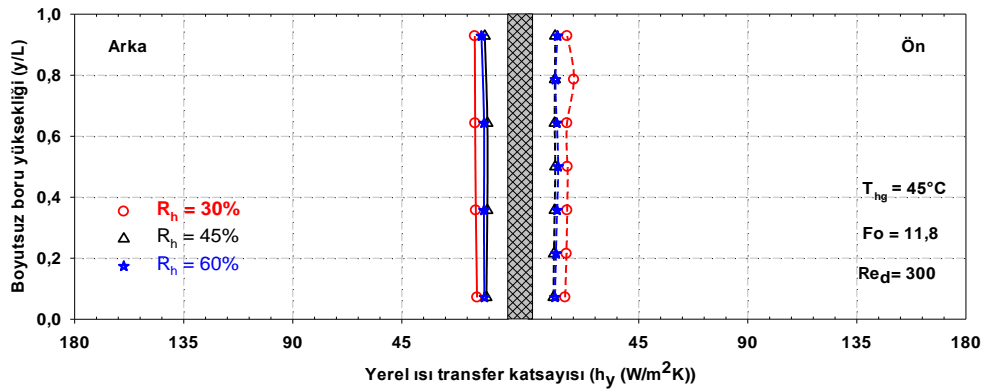
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.133. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

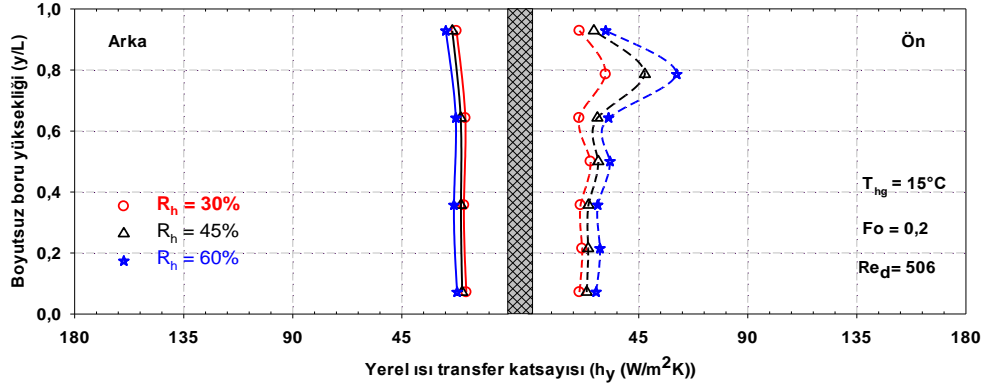


Şekil E1.134. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

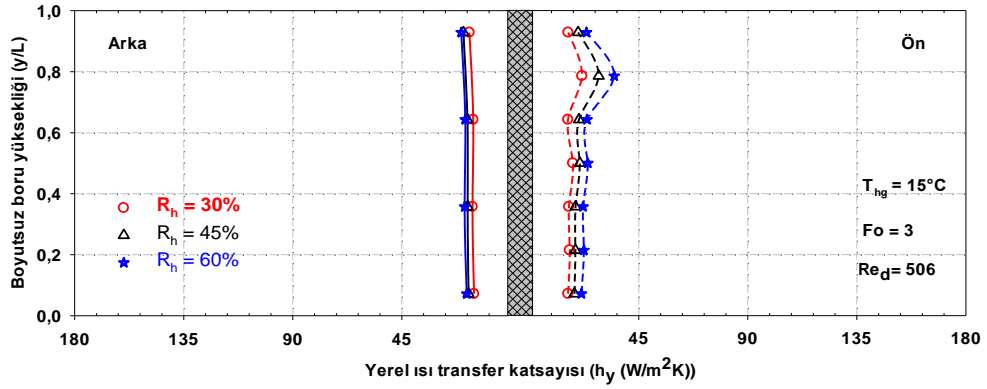


Şekil E1.135. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=300$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

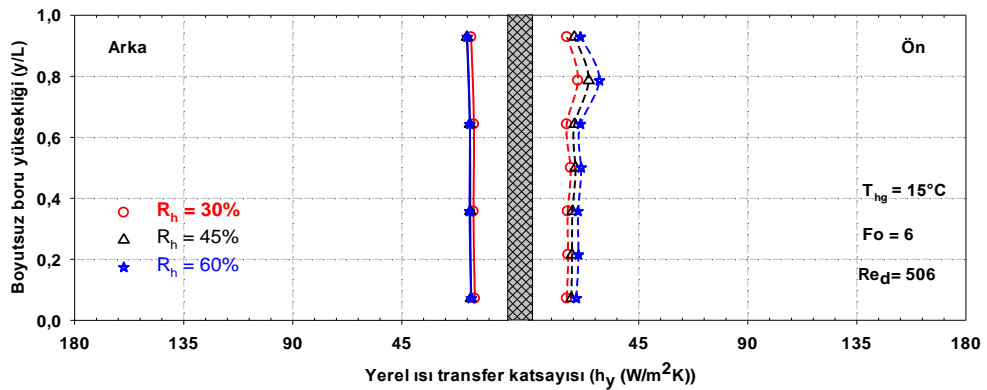
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.136. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

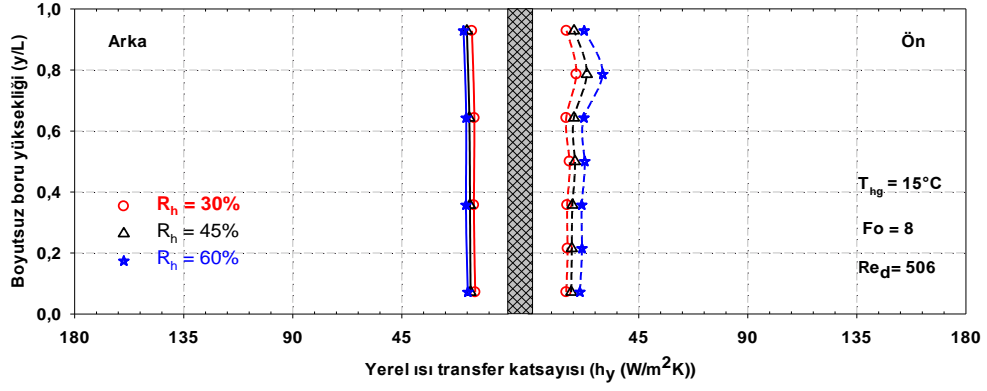


Şekil E1.137. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

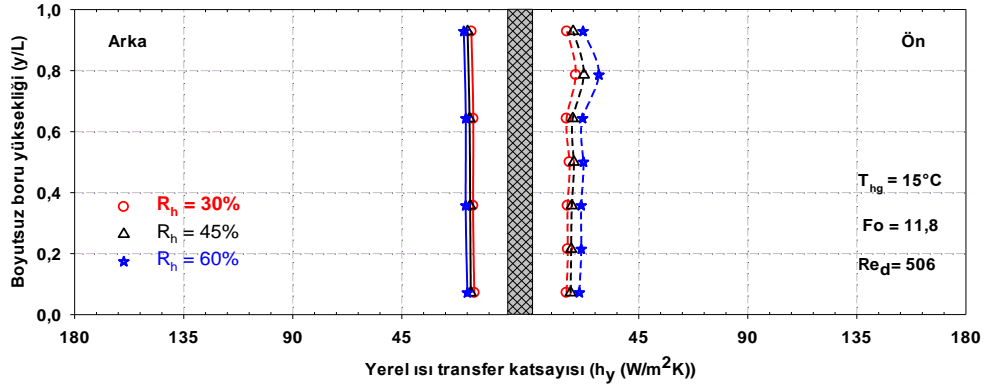


Şekil E1.138. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

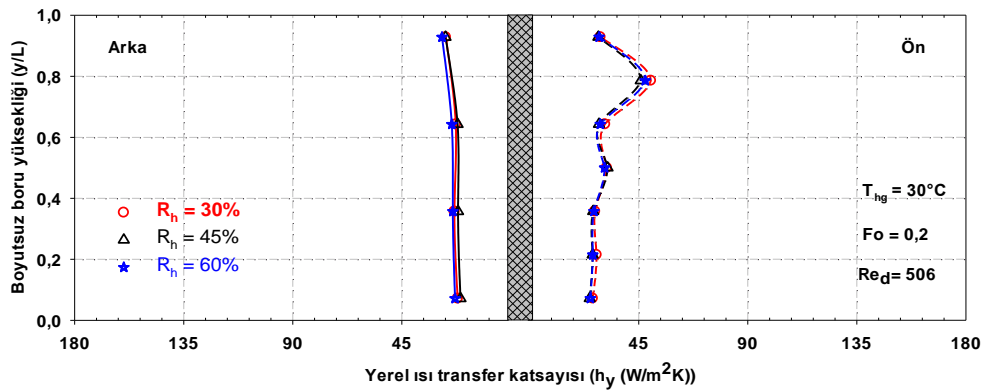
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.139. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

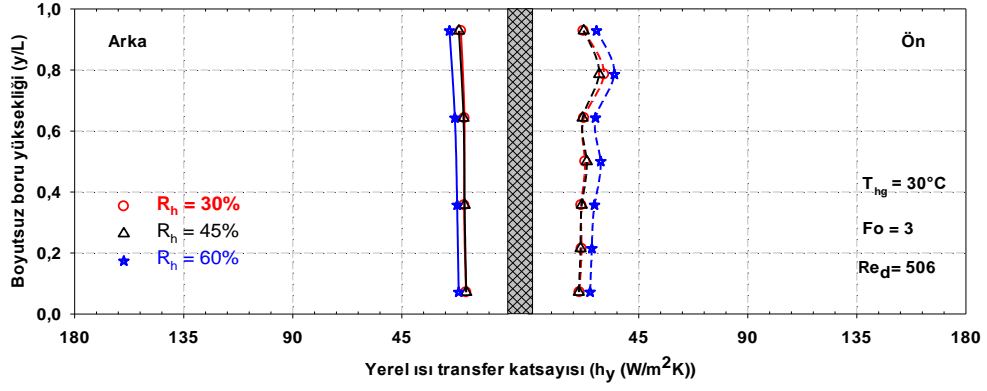


Şekil E1.140. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

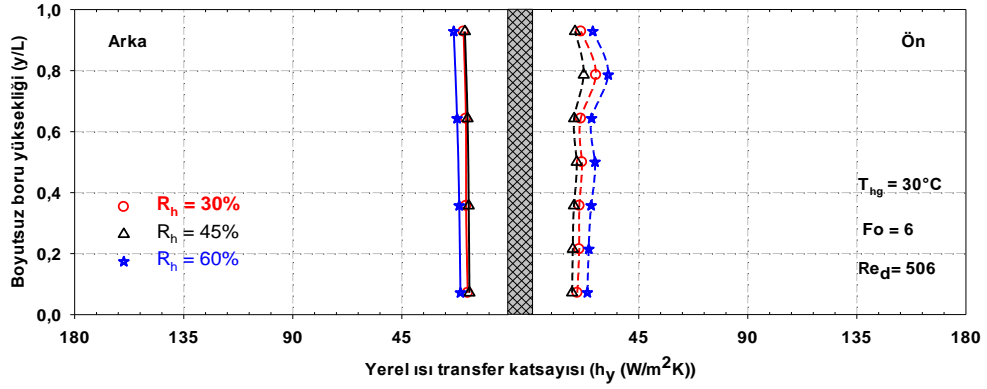


Şekil E1.141. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=0,2$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

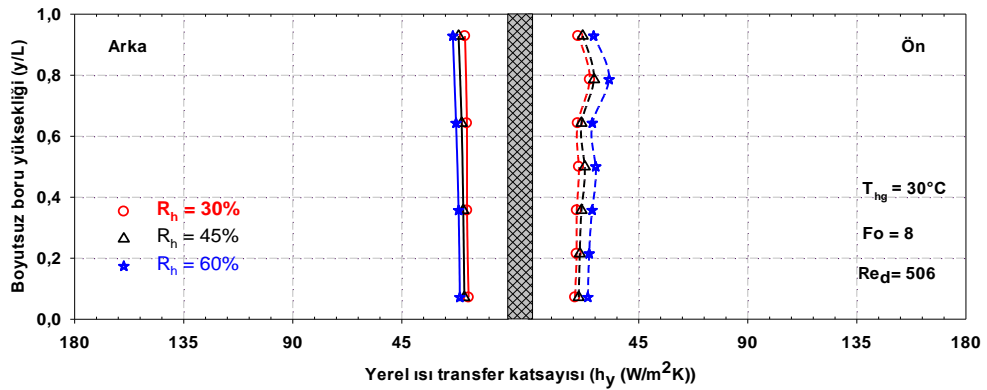
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.142. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

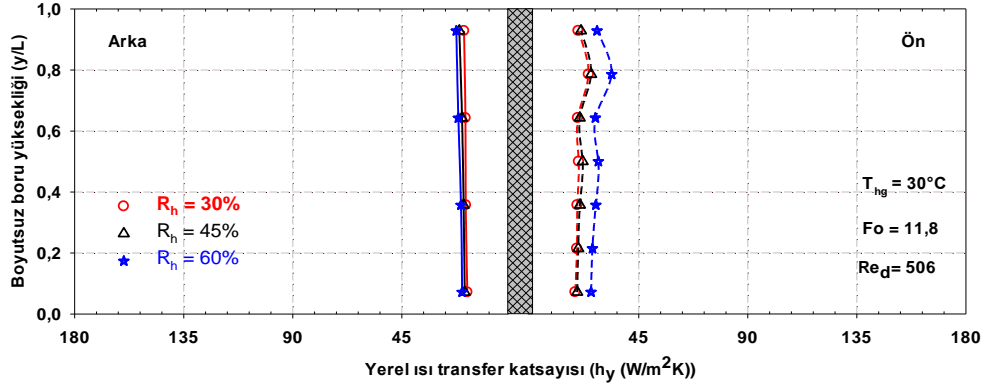


Şekil E1.143. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

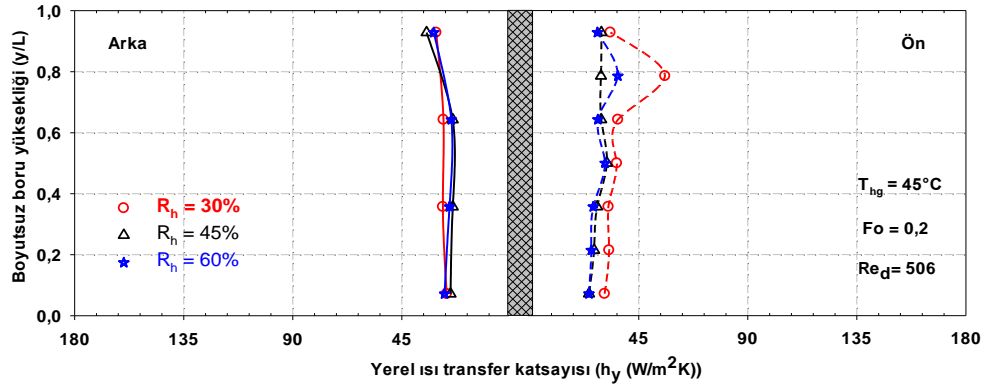


Şekil E1.144. $T_{hg}=30^{\circ}\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

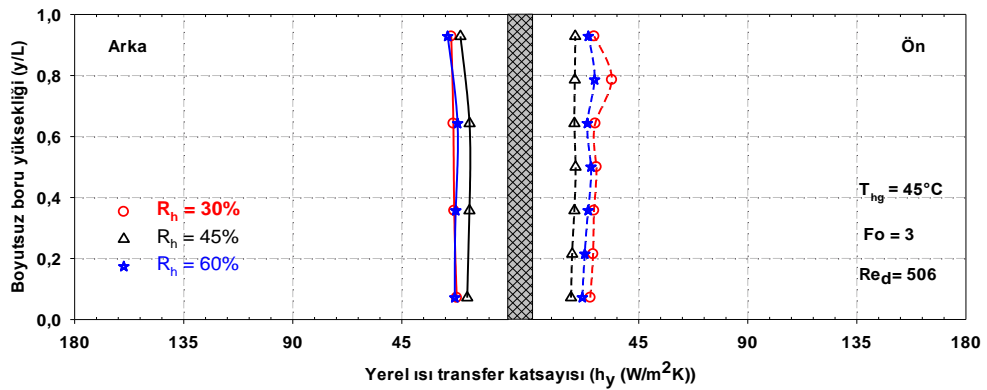
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.145. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

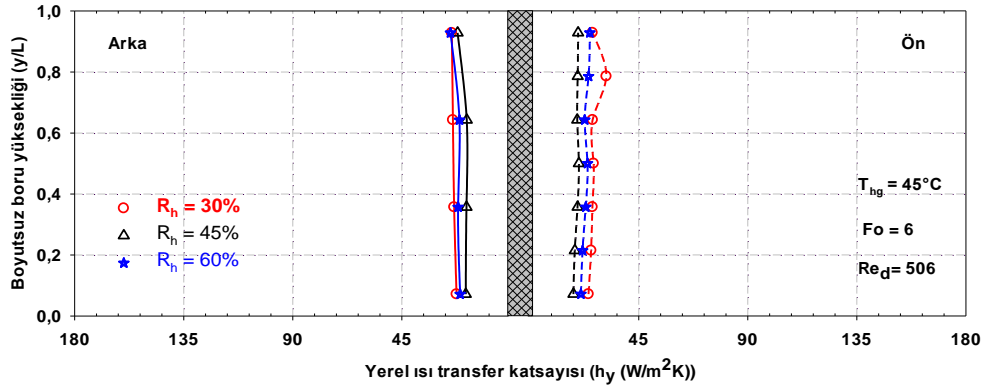


Şekil E1.146. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

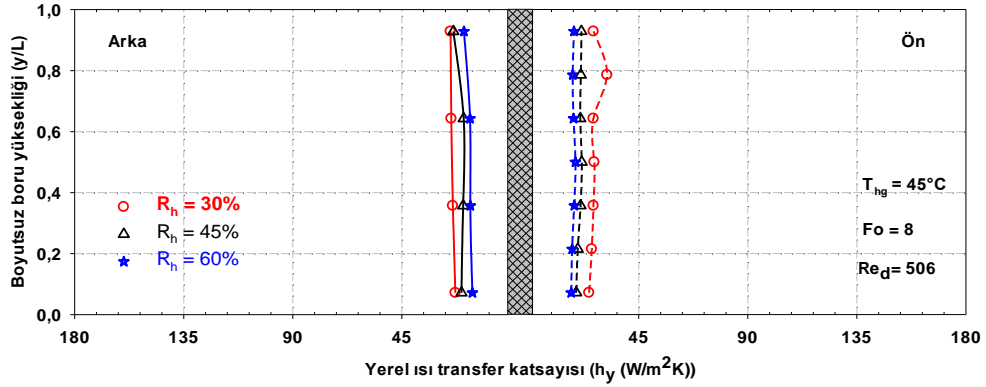


Şekil E1.147. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

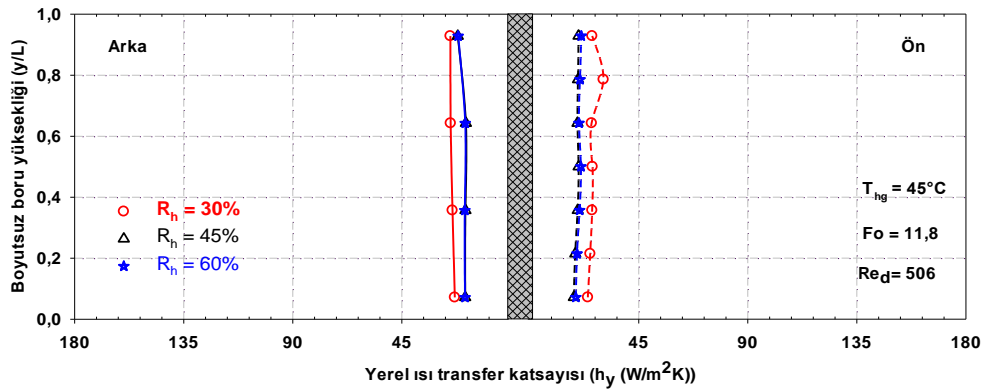
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.148. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

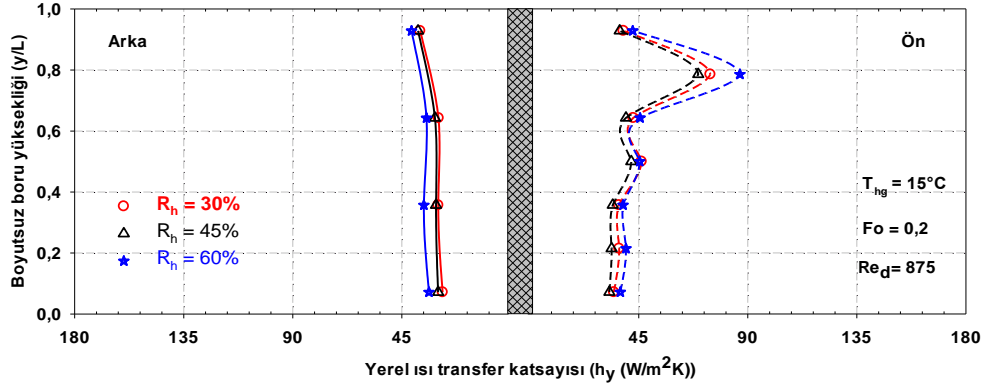


Şekil E1.149. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

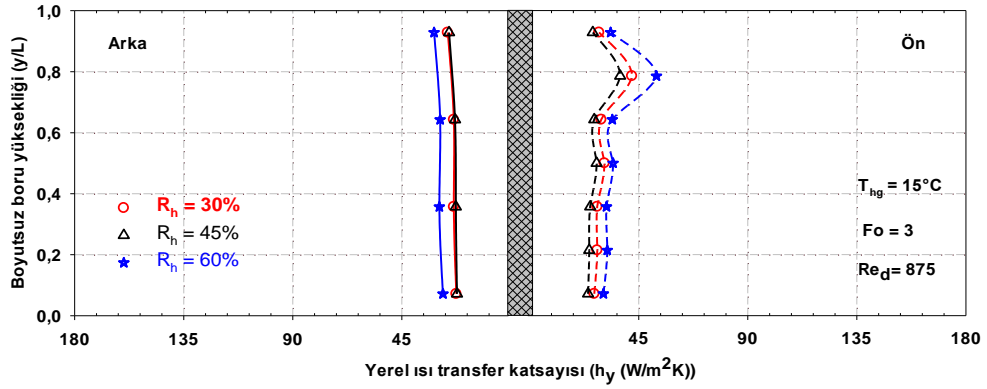


Şekil E1.150. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=506$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

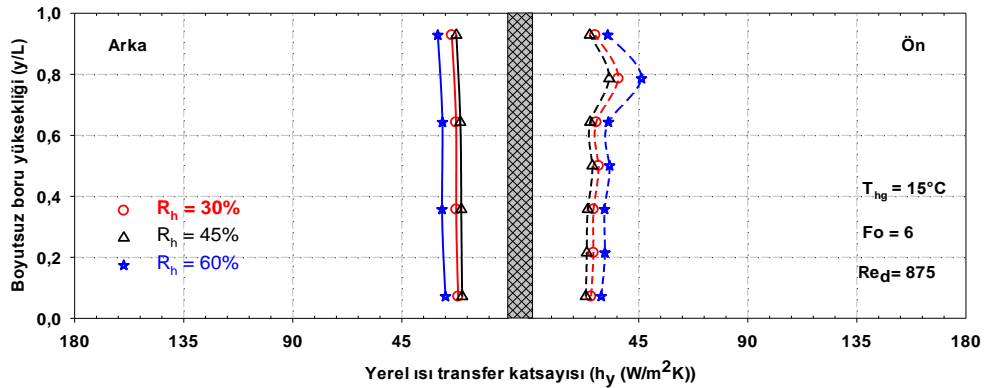
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.151. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

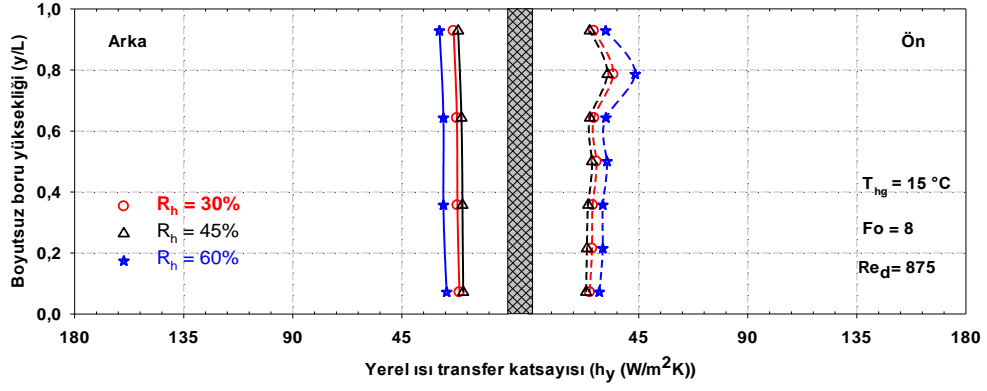


Şekil E1.152. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

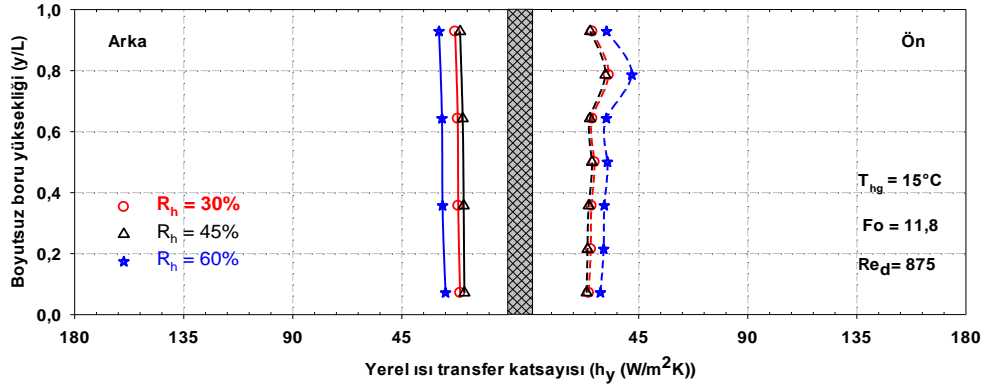


Şekil E1.153. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

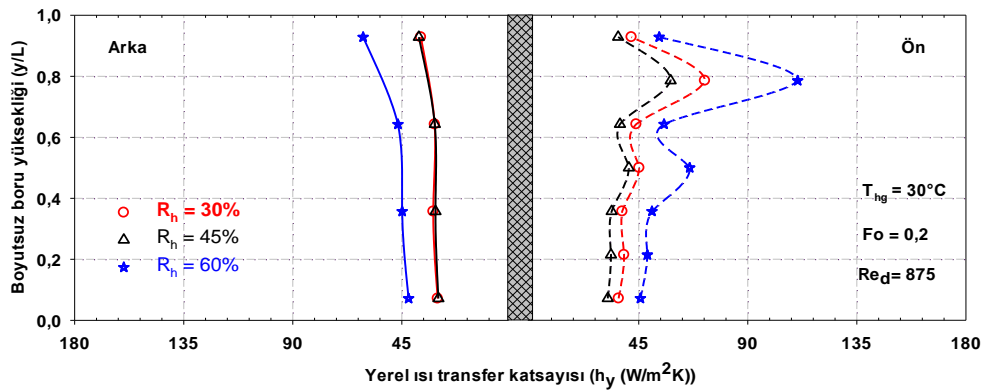
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.154. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

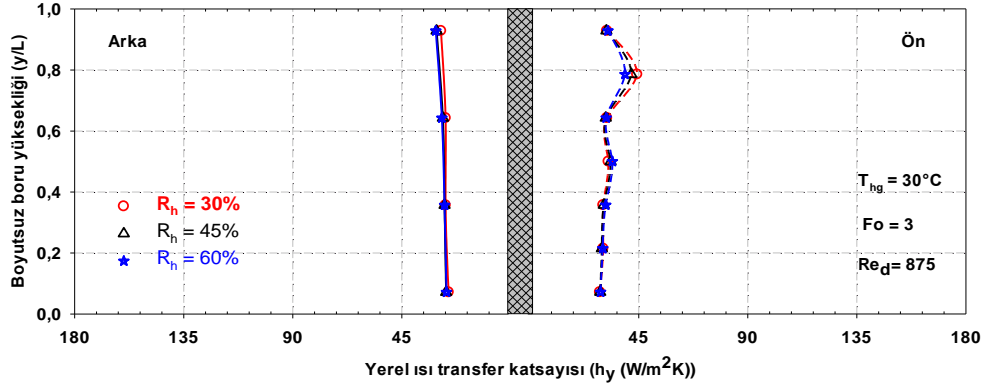


Şekil E1.155. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

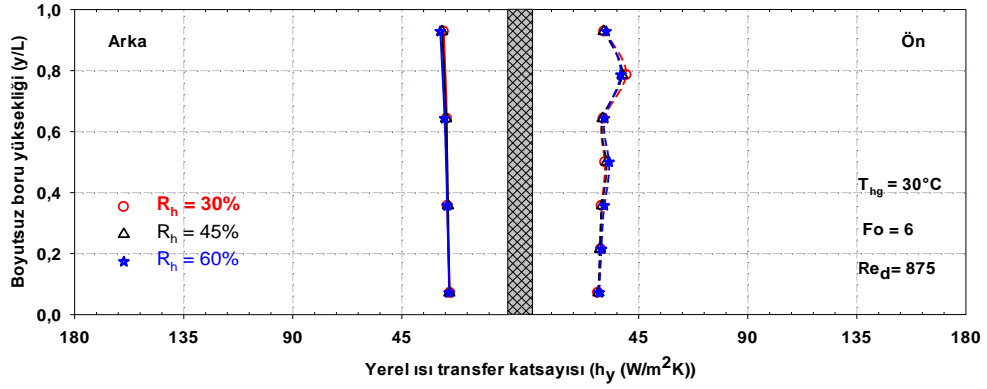


Şekil E1.156. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

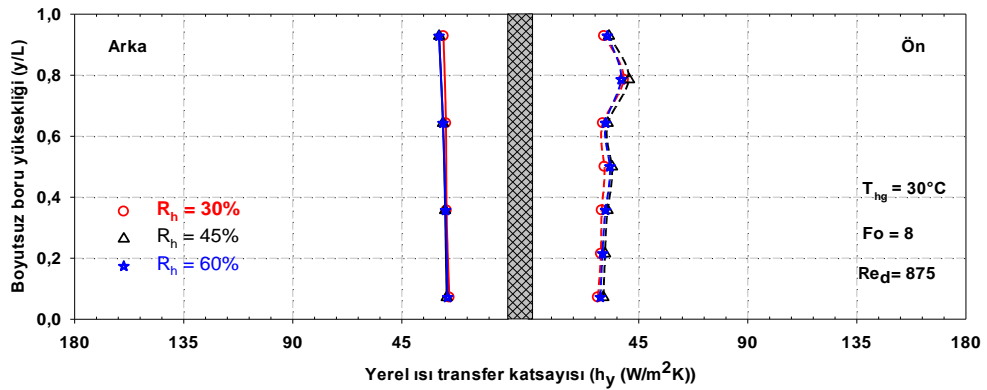
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yükseliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.157. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=3$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

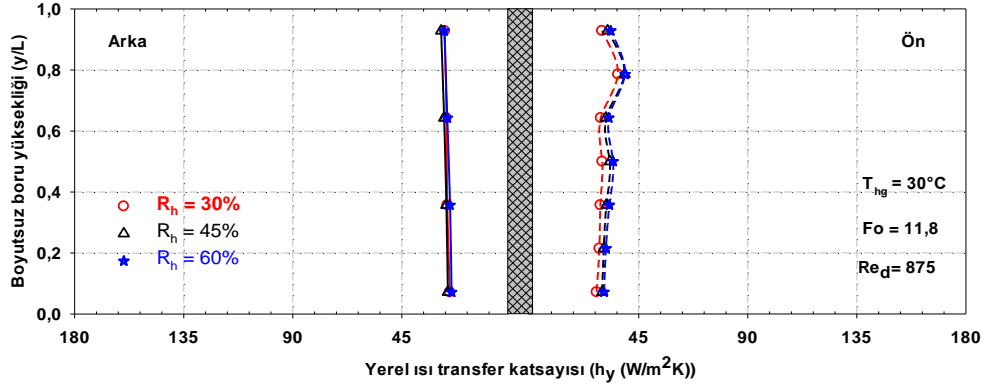


Şekil E1.159. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=6$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

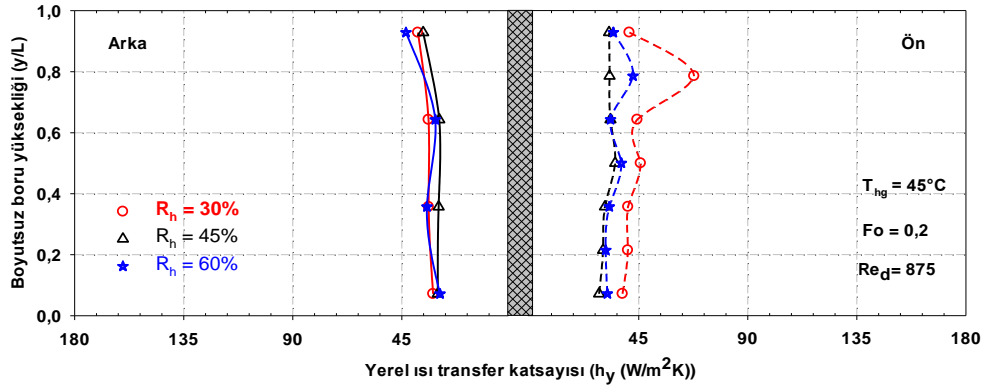


Şekil E1.160. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

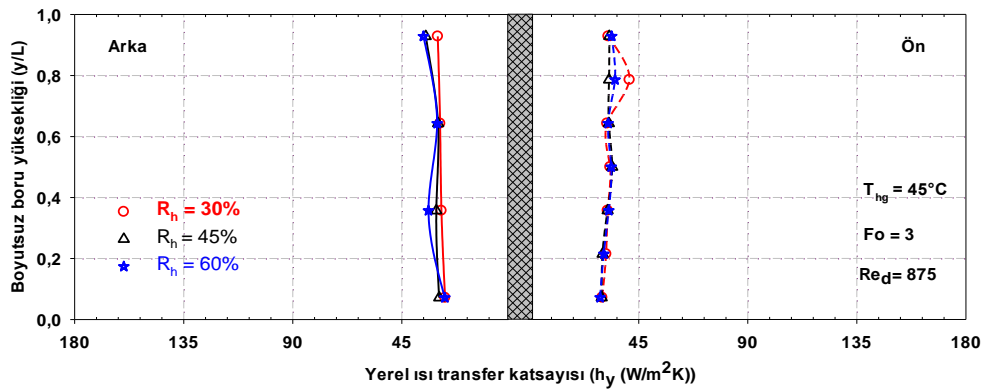
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.161. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=11,8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

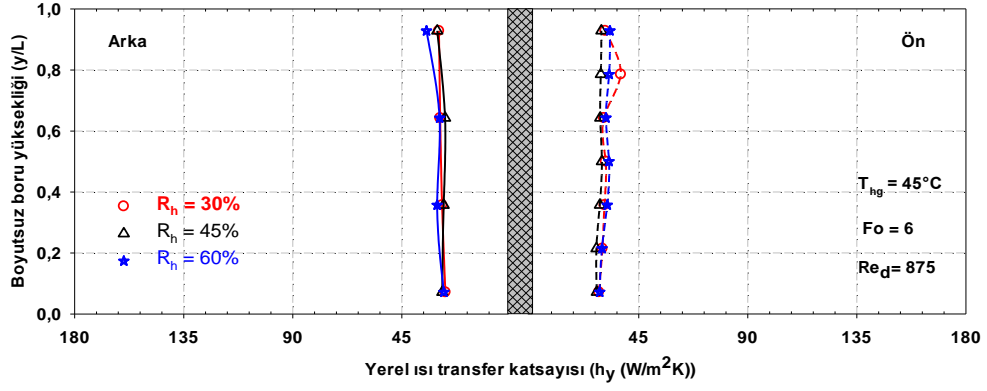


Şekil E1.162. $T_{hg}=45^\circ C$, $Fo=0,2$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

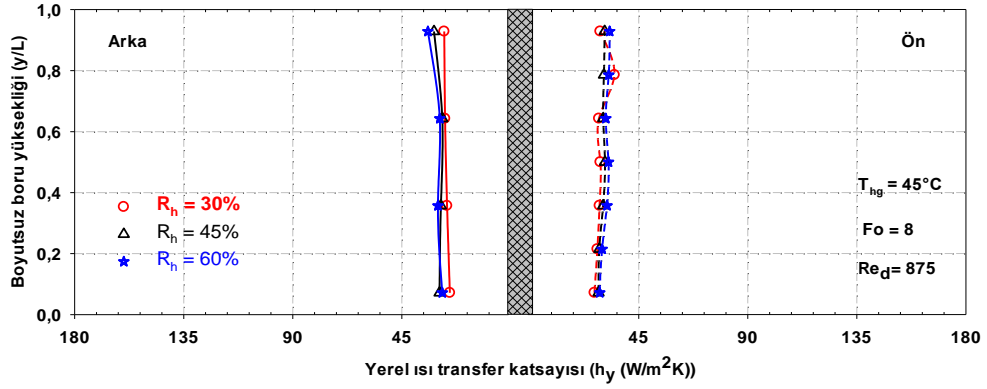


Şekil E1.163. $T_{hg}=45^\circ C$, $Fo=3$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

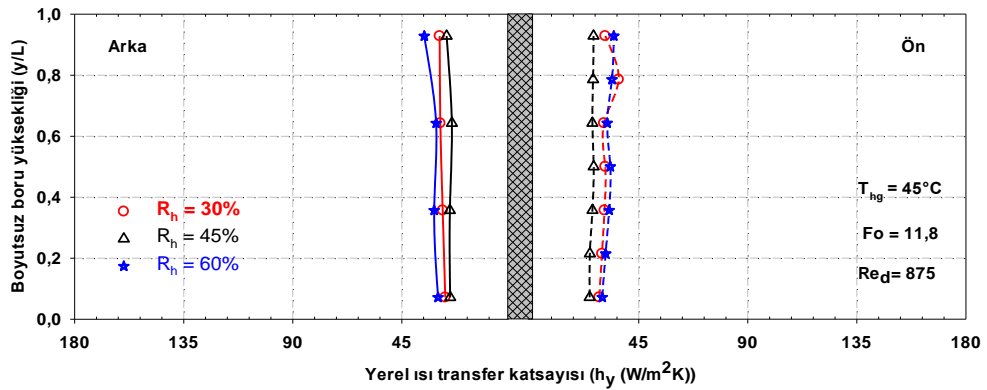
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.164. $T_{hg}=45^\circ C$, $Fo=6$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

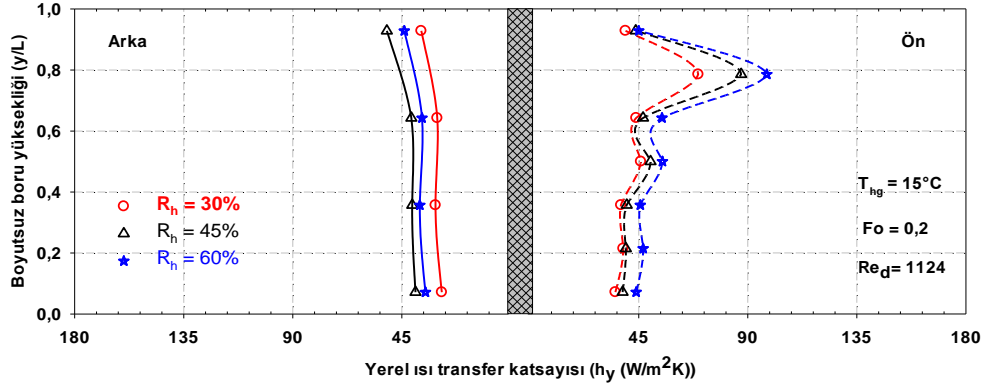


Şekil E1.165. $T_{hg}=45^\circ C$, $Fo=8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

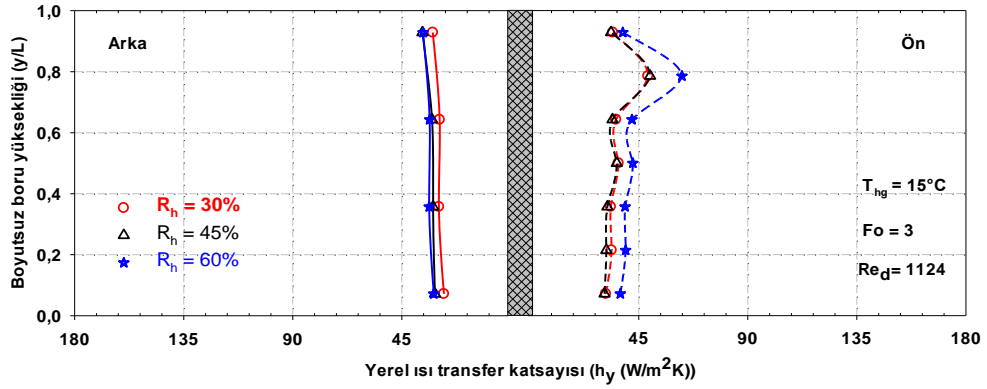


Şekil E1.166. $T_{hg}=45^\circ C$, $Fo=11,8$, $Re_d=875$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

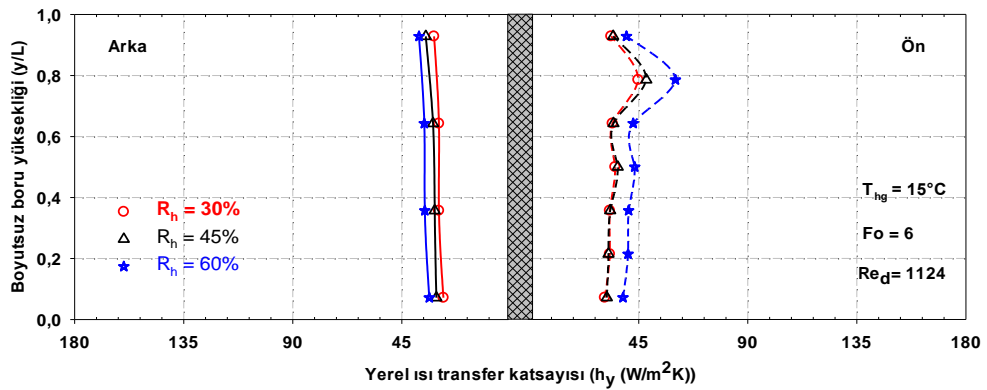
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.167. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

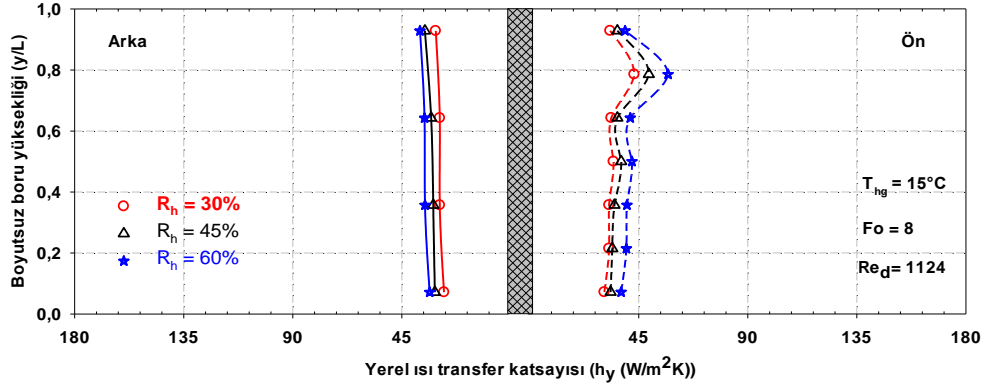


Şekil E1.168. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

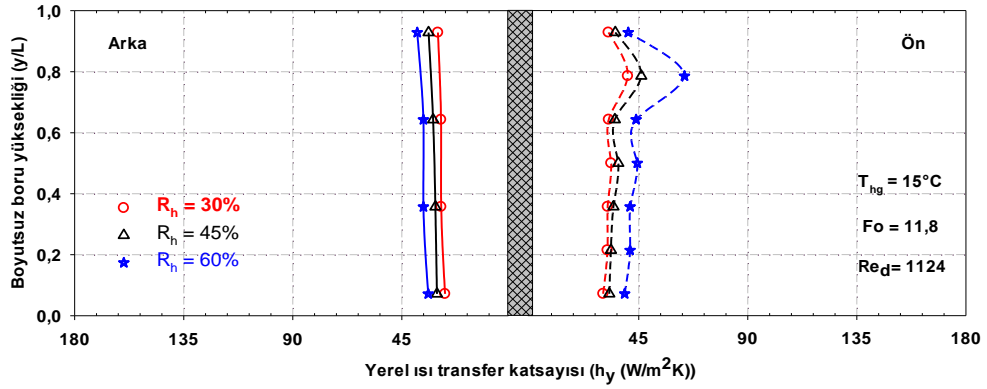


Şekil E1.169. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

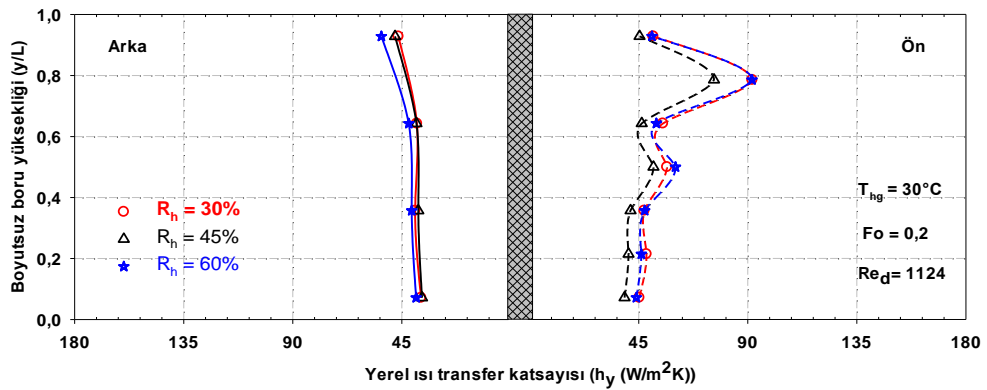
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.170. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

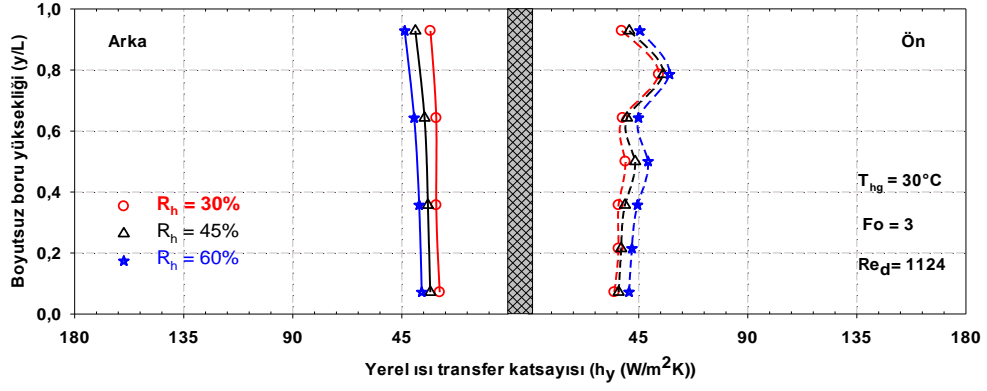


Şekil E1.171. $T_{hg}=15^\circ C$, $Fo=11,8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

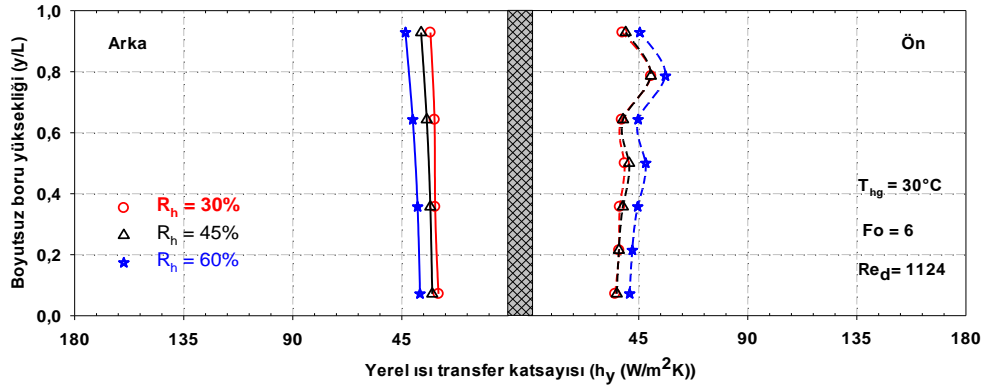


Şekil E1.172. $T_{hg}=30^\circ C$, $Fo=0,2$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

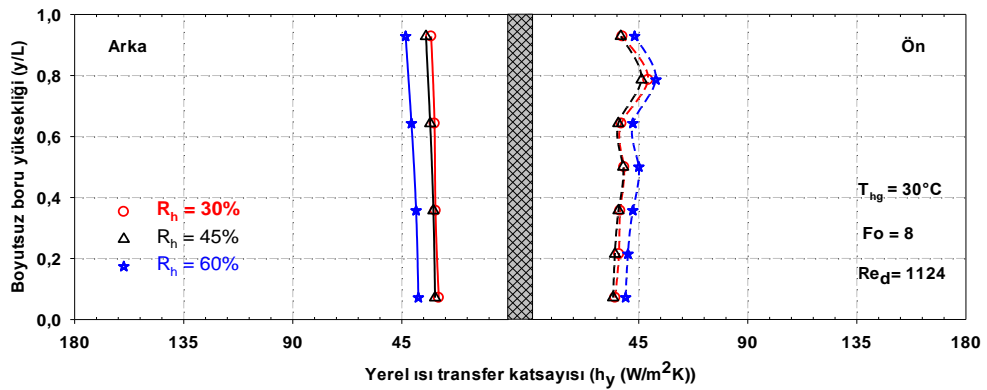
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.173. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

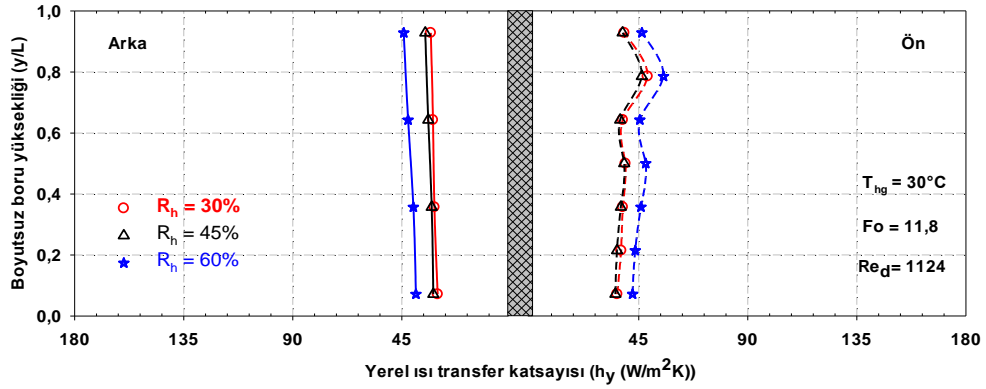


Şekil E1.174. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

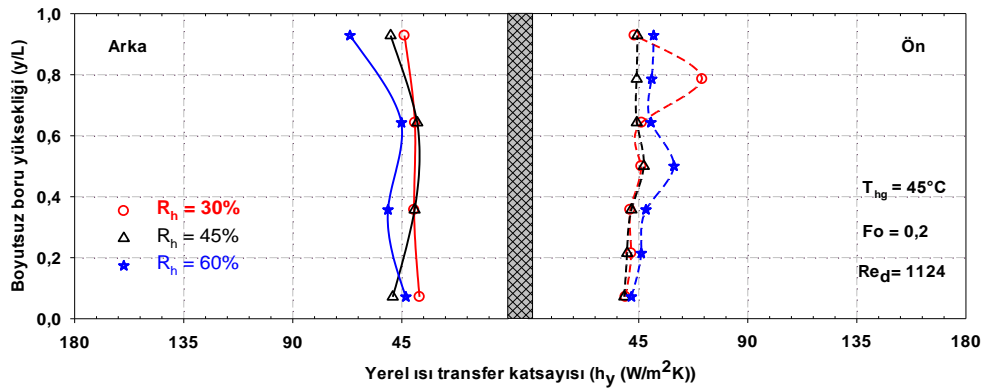


Şekil E1.175. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

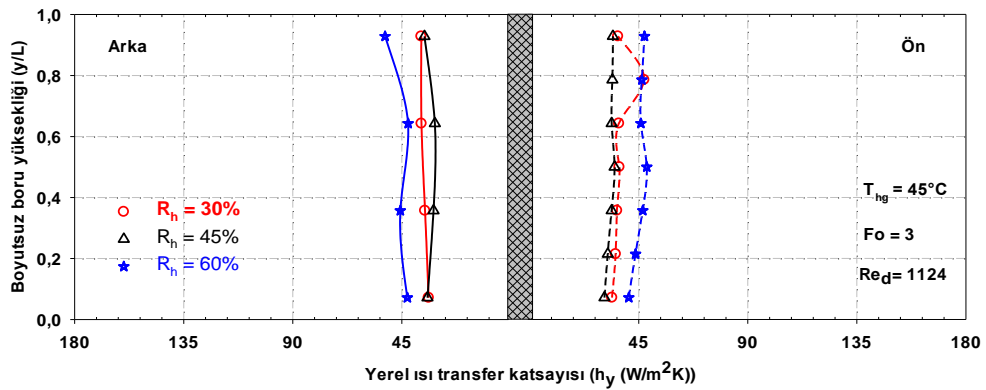
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.176. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

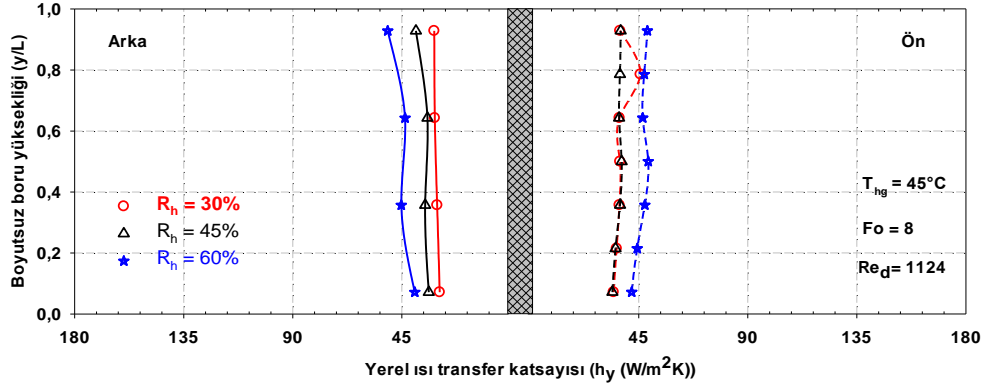


Şekil E1.177. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

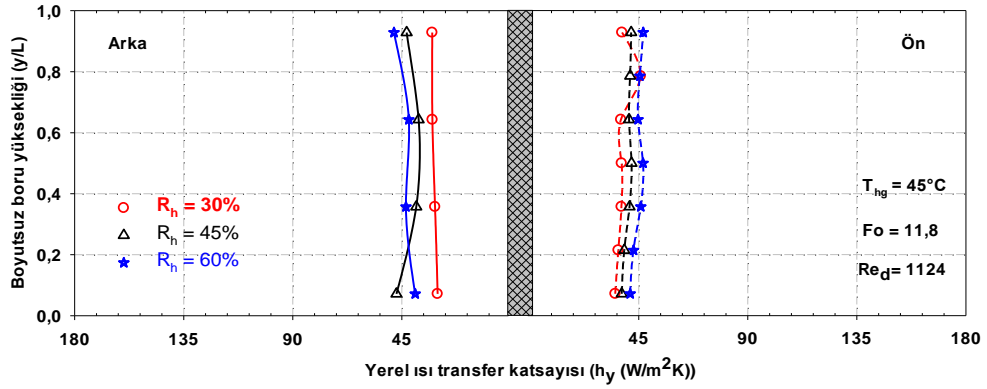


Şekil E1.178. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

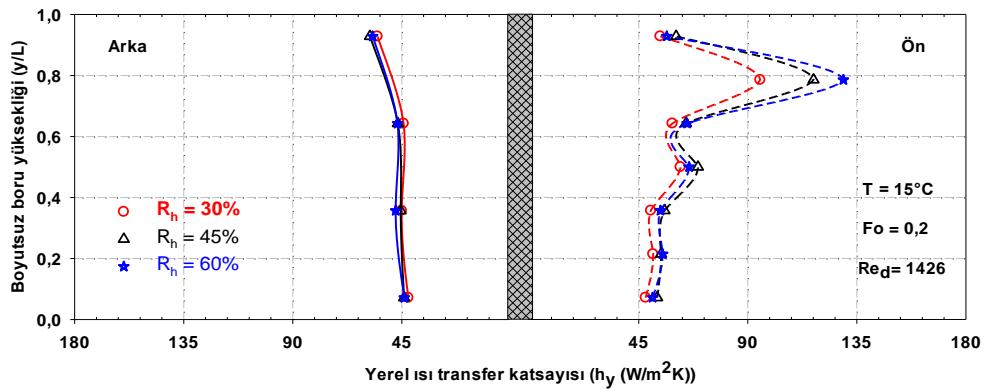
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.179. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

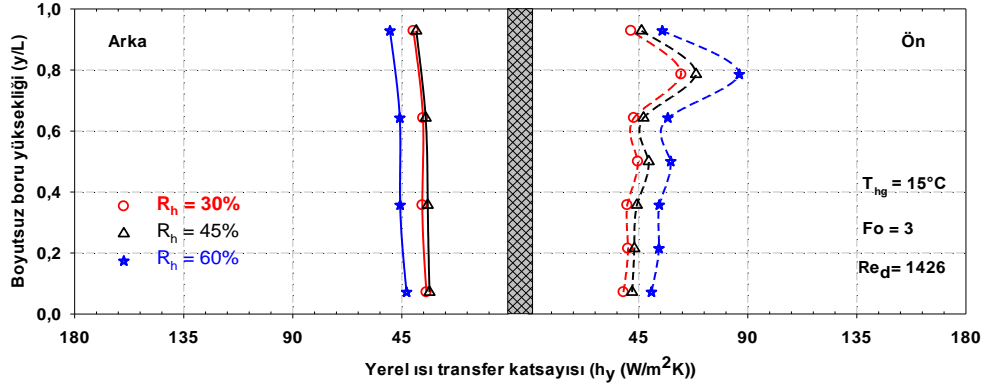


Şekil E1.180. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=1124$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

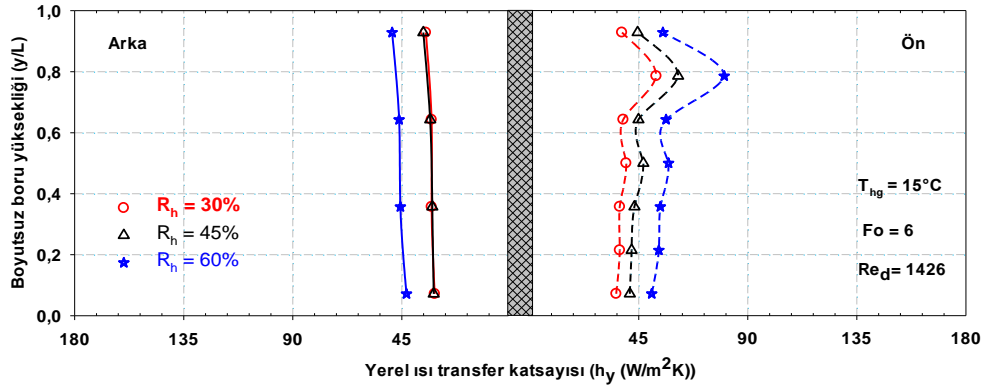


Şekil E1.181. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

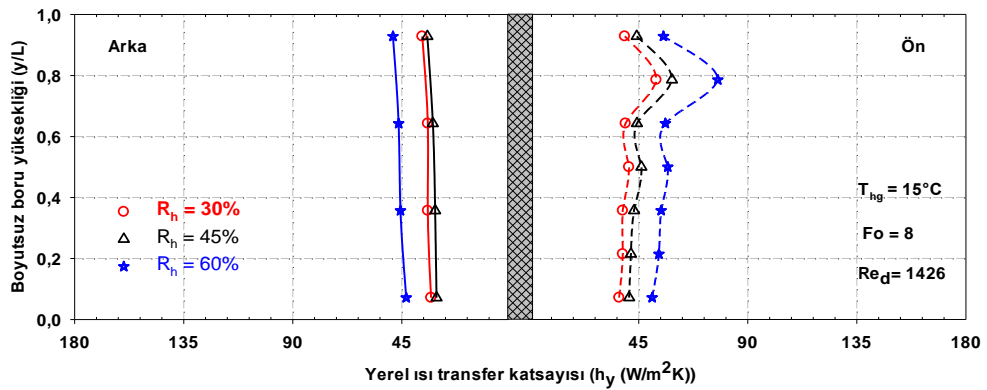
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.182. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

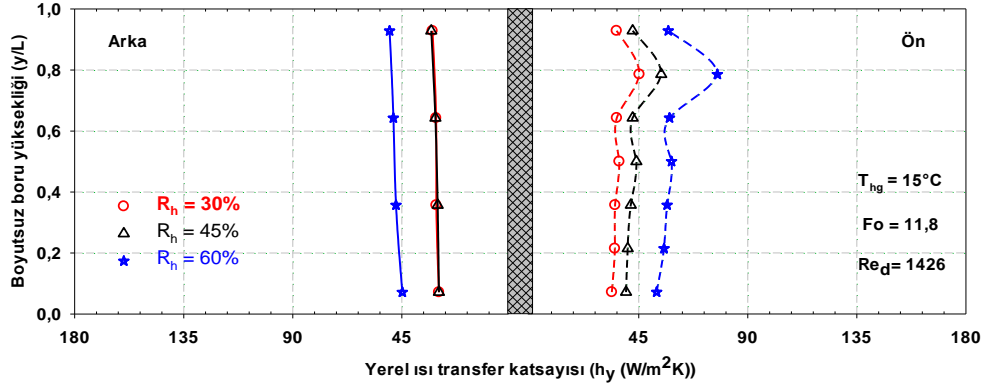


Şekil E1.183. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

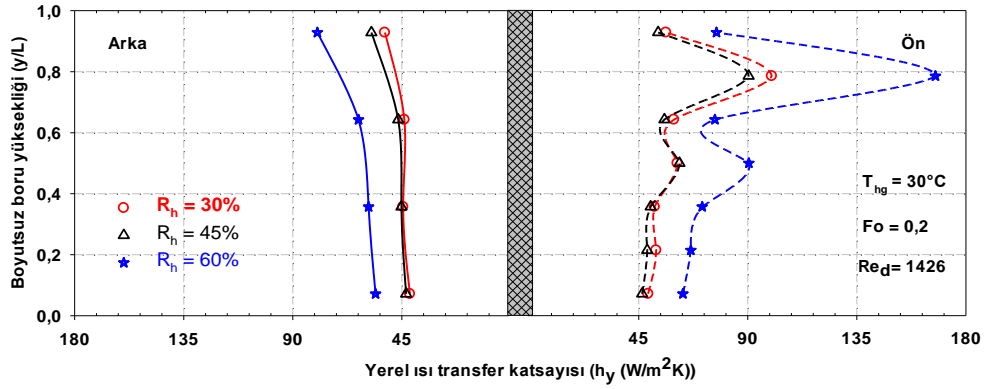


Şekil E1.184. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

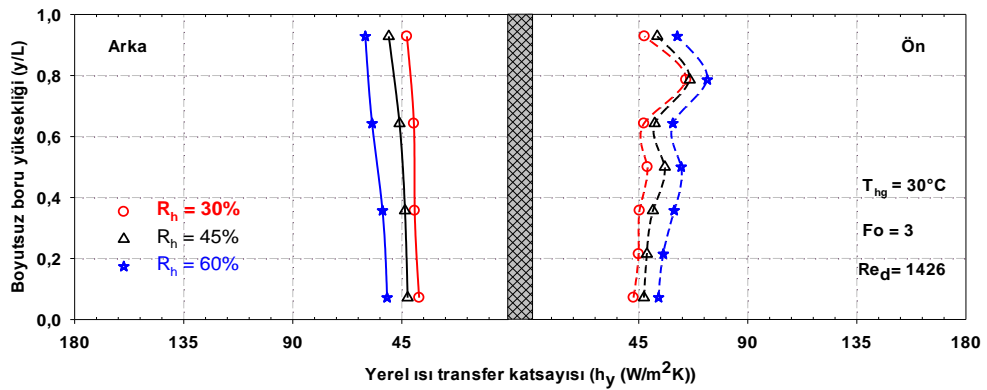
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.185. $T_{hg}=15^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

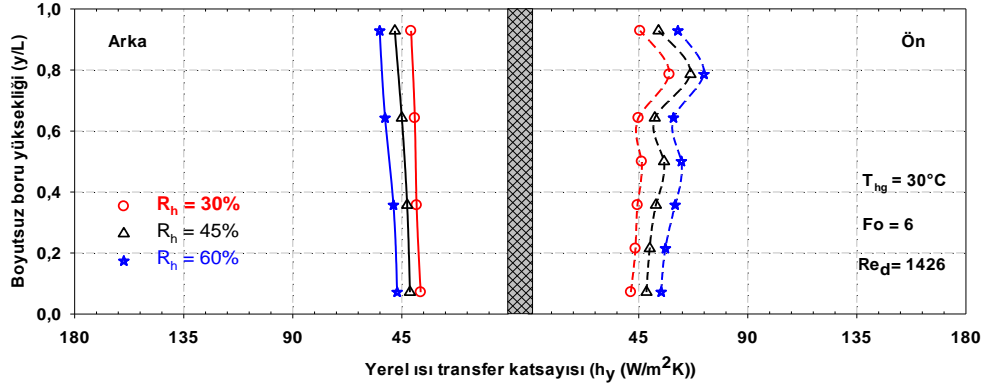


Şekil E1.186. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=0,2$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

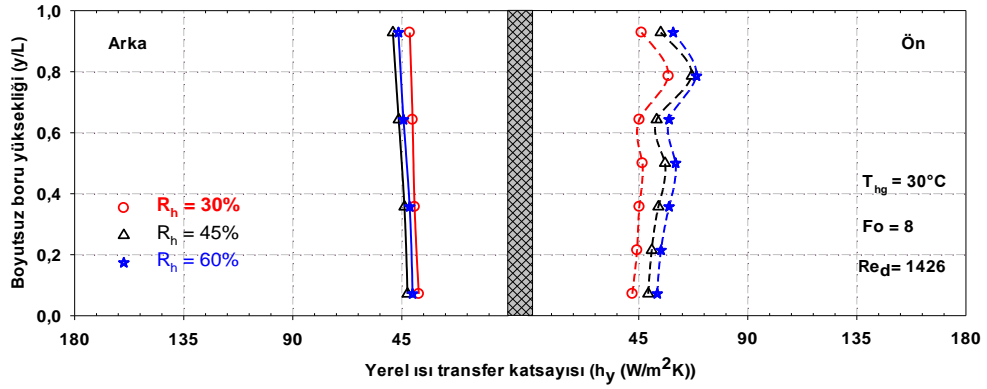


Şekil E1.187. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=3$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

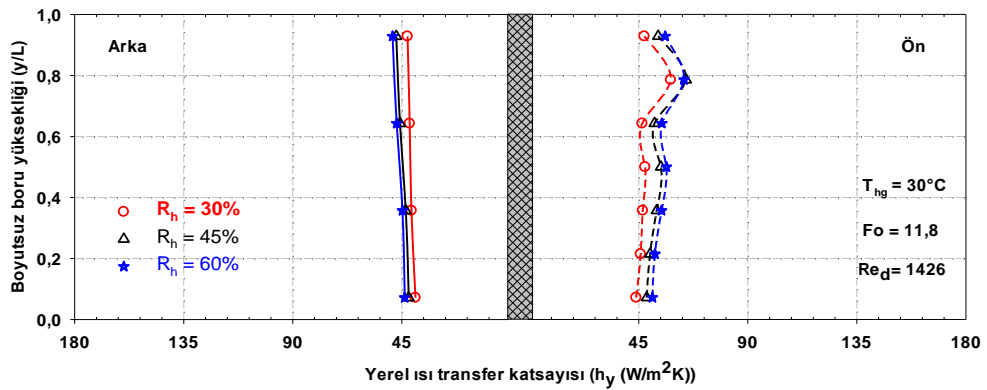
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.188. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=6$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

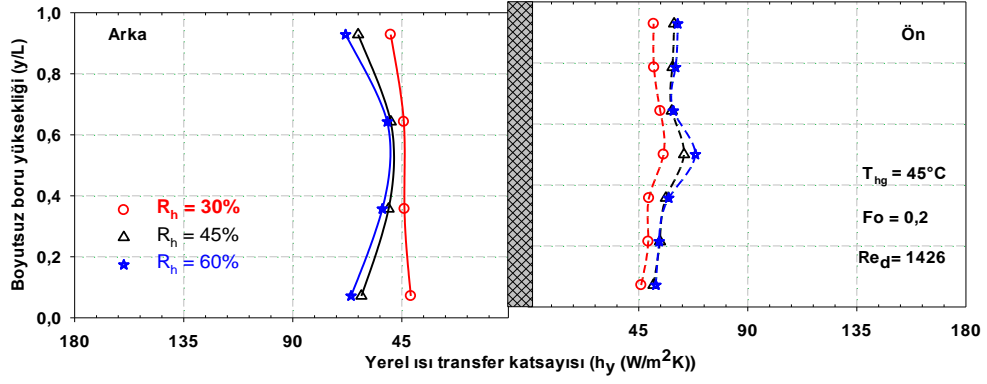


Şekil E1.189. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

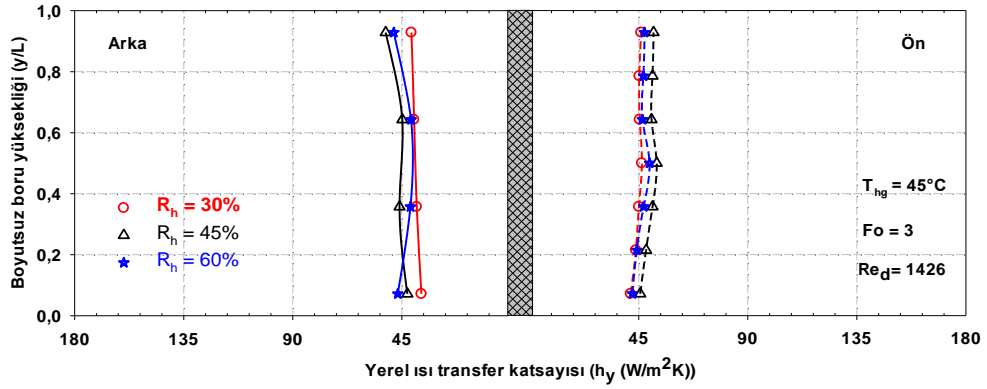


Şekil E1.190. $T_{hg}=30^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

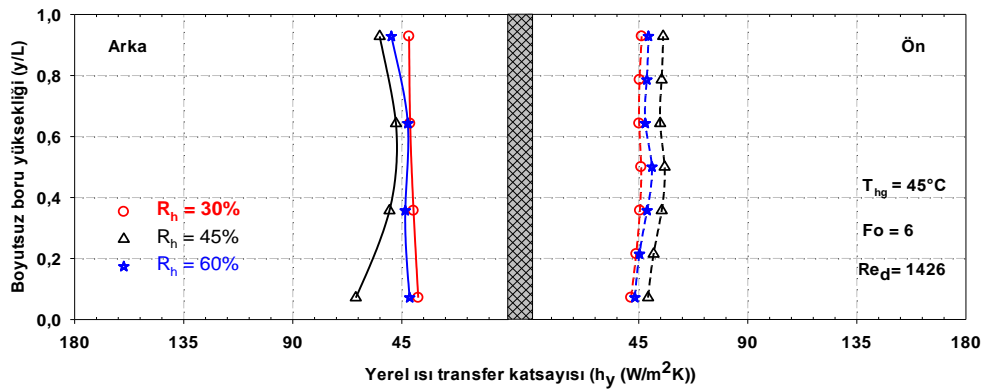
EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.



Şekil E1.191. T_{hg}=45°C, Fo=0,2, Re_d=1426 için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

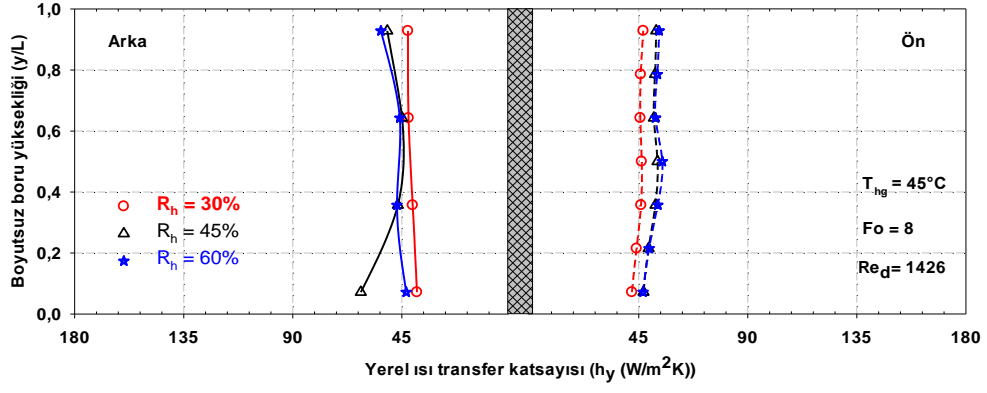


Şekil E1.192. T_{hg}=45°C, Fo=3, Re_d=1426 için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

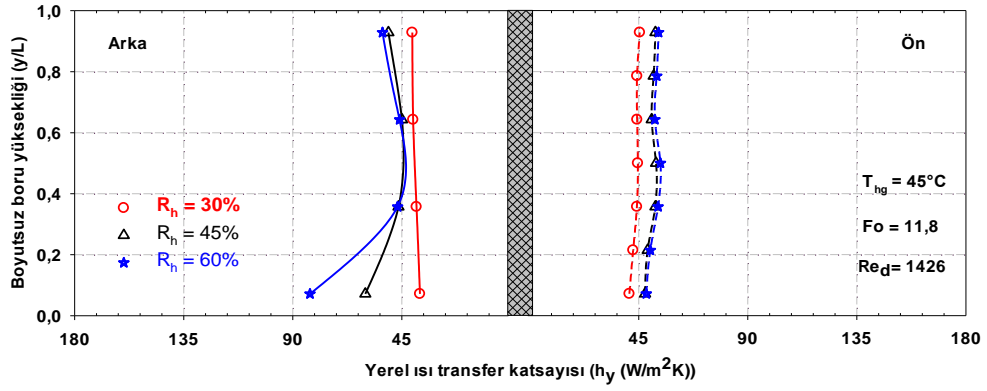


Şekil E1.193. T_{hg}=45°C, Fo=6, Re_d=1426 için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

EK-1(Devam). Boru ön ve arkasındaki boyutsuz boru yüksekliği boyunca yerel ısı transferinin zamana bağlı değişimi.

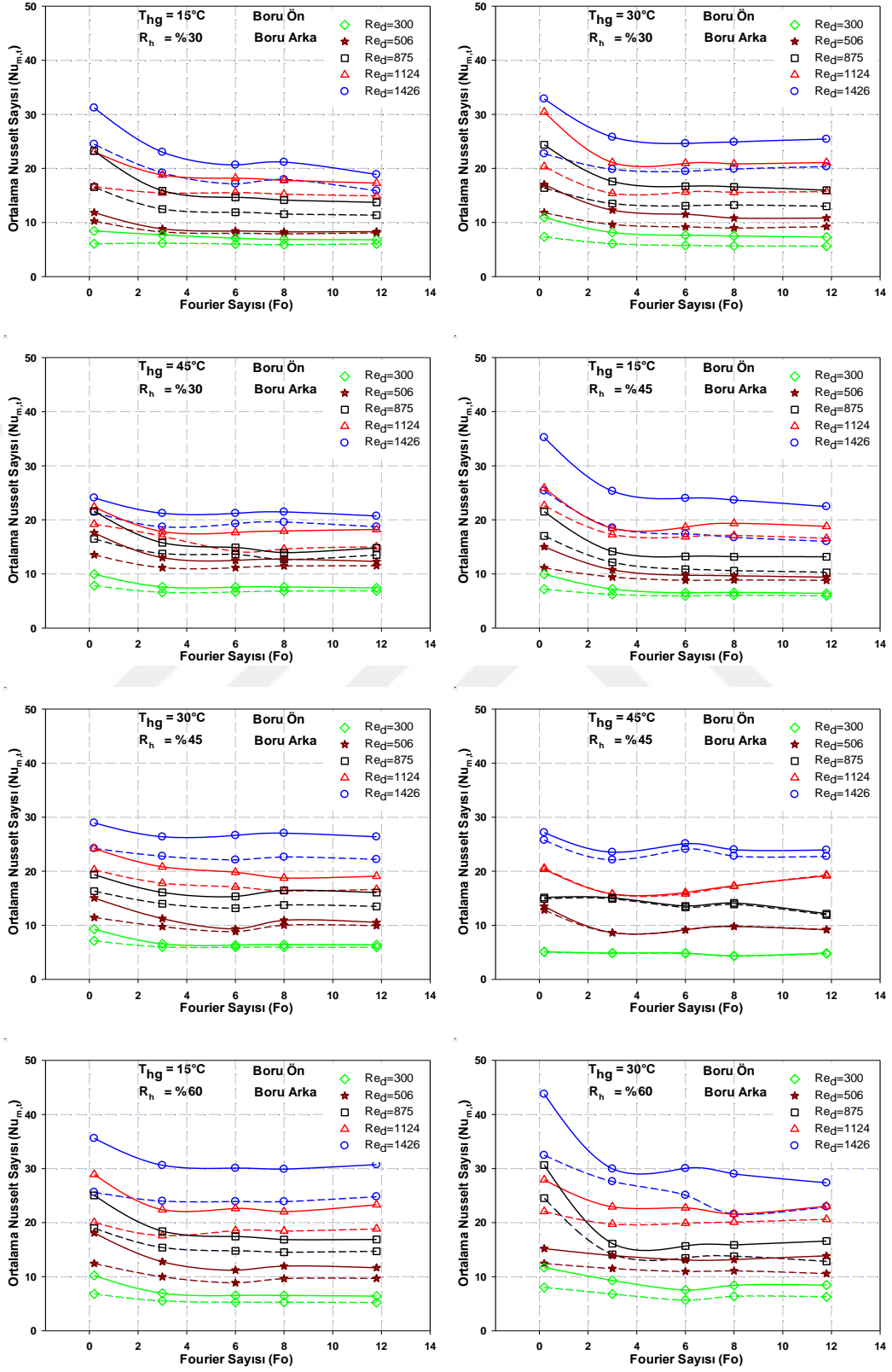


Şekil E1.194. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi



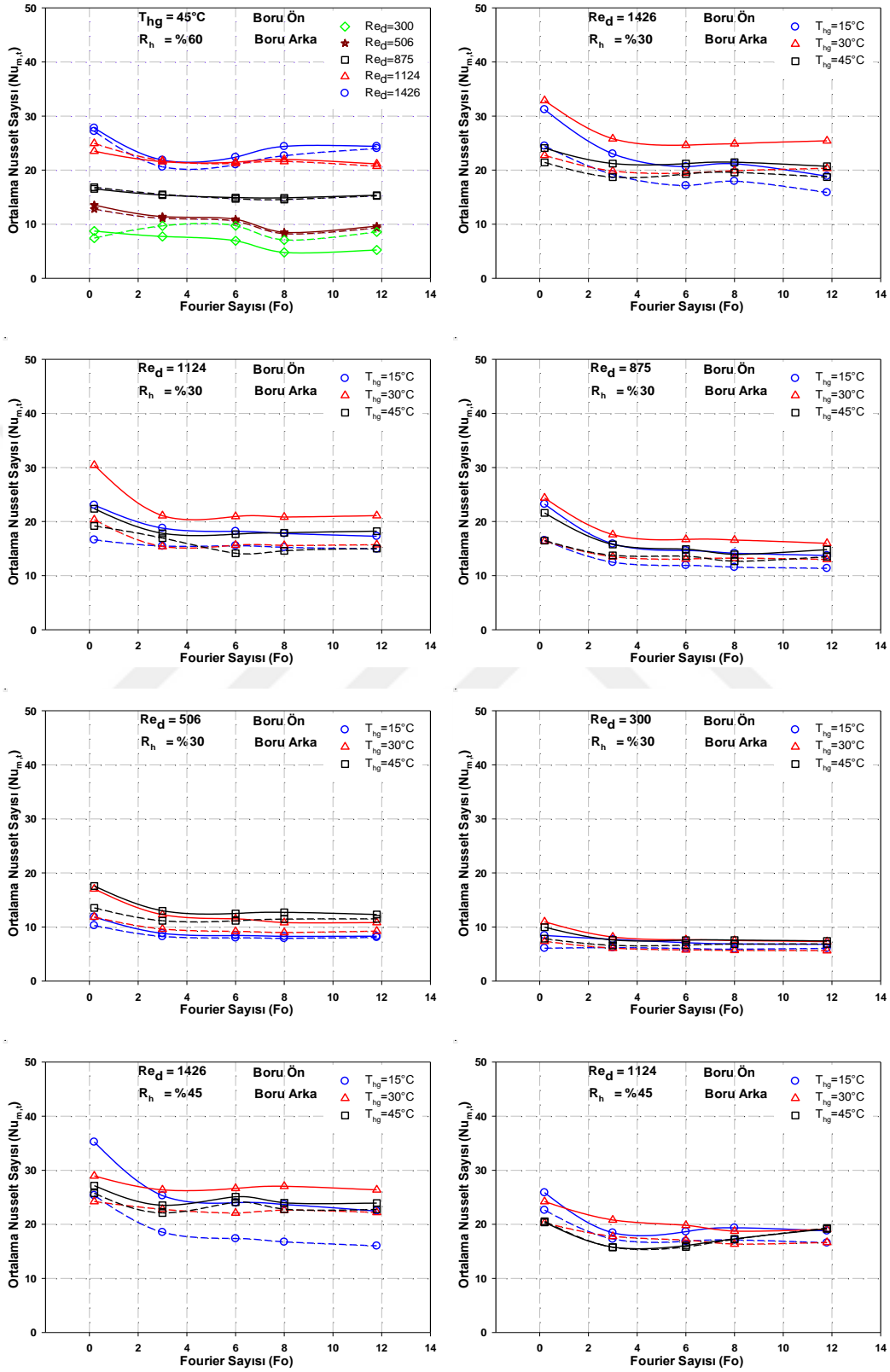
Şekil E1.195. $T_{hg}=45^\circ\text{C}$, $Fo=11,8$, $Re_d=1426$ için yerel ısı transfer katsayısının R_h 'ye göre değişimi

EK-2. Boru ön ve arkasındaki ortalama Nusselt sayısının zamana göre değişimi



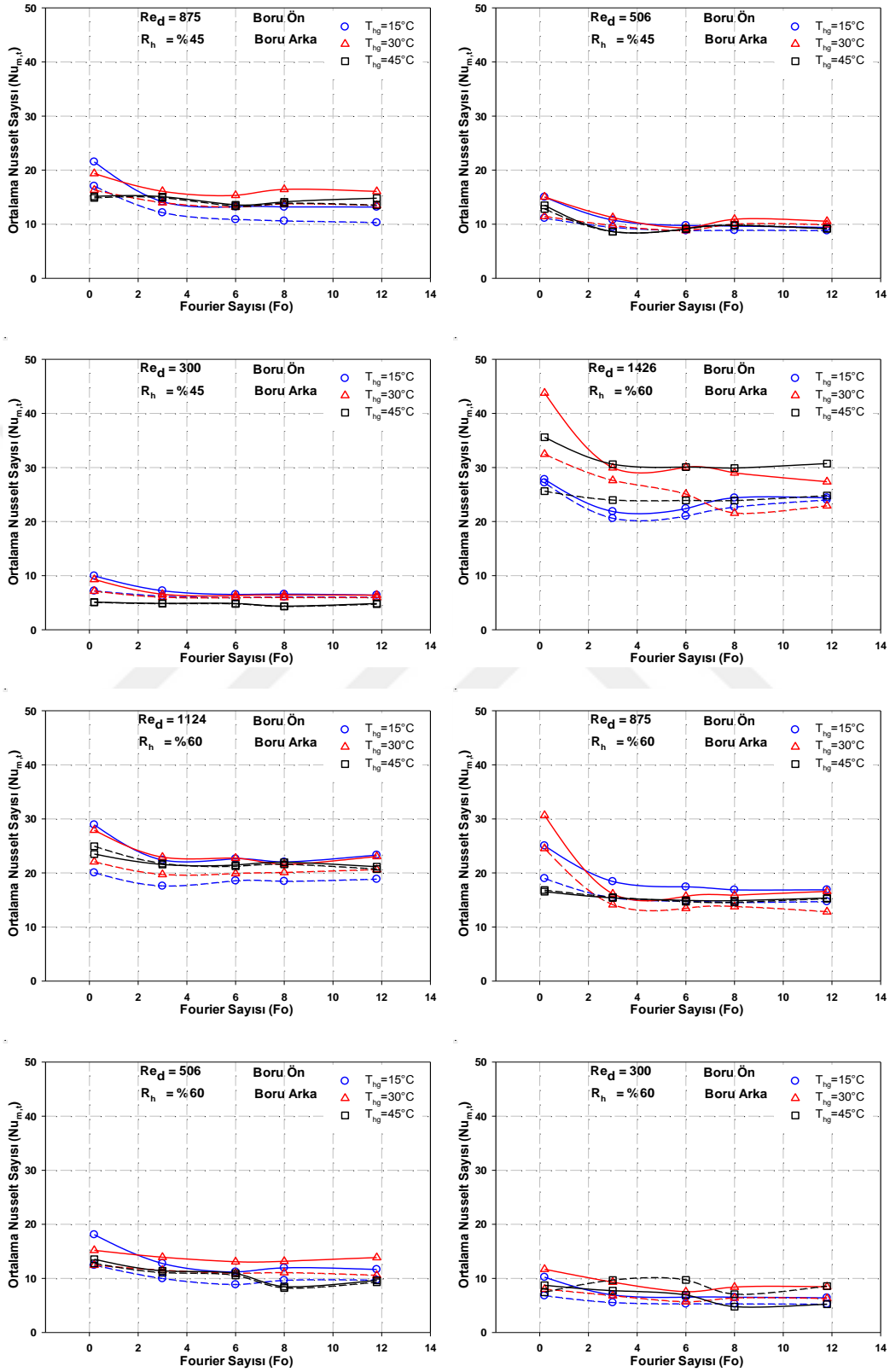
Şekil E2.1. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ortalama Nusselt sayısının zamana göre değişimi



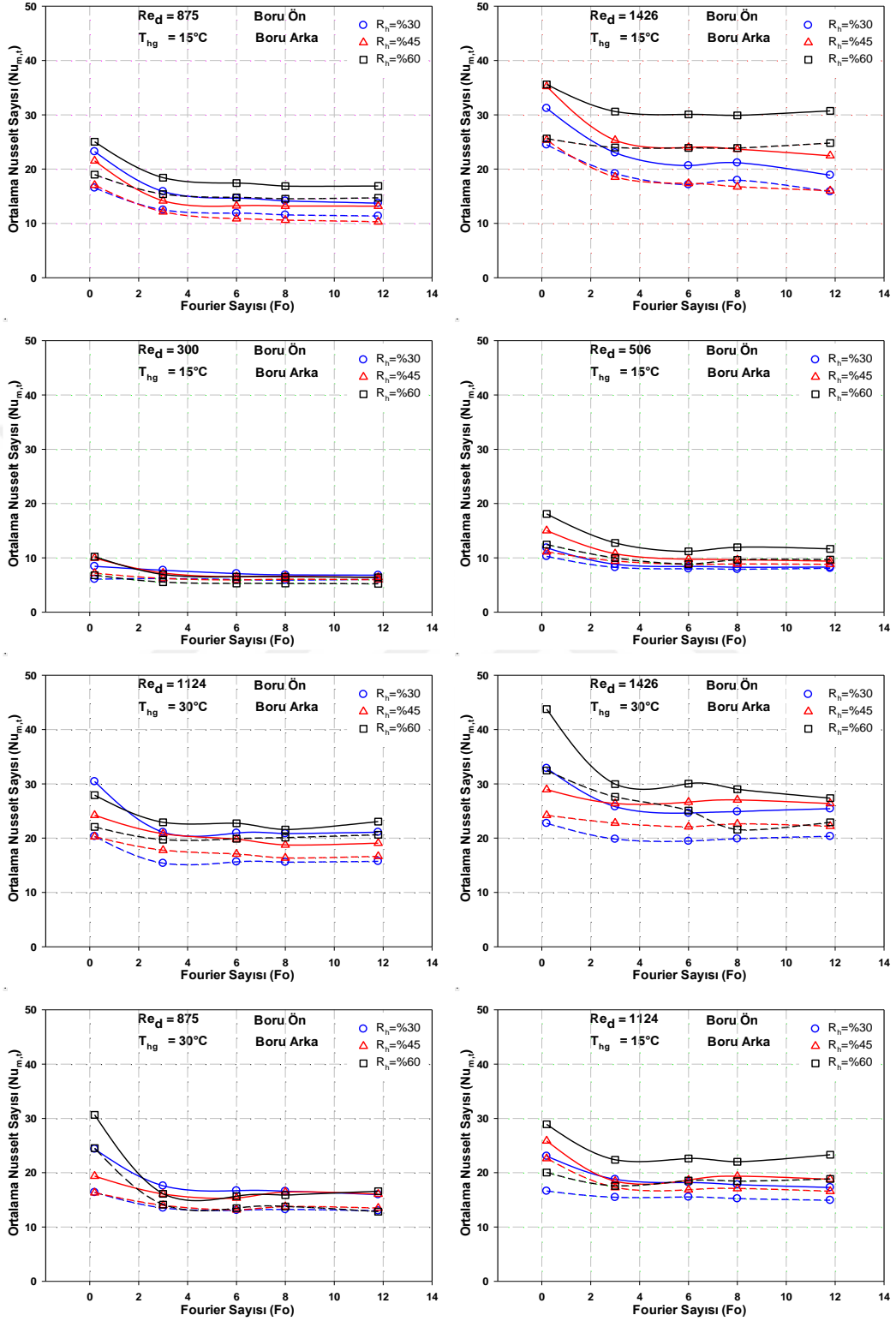
Şekil E2.2. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d 'lerde $Nu_{m,t}$ 'nin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ortalama Nusselt sayısının zamana göre değişimi



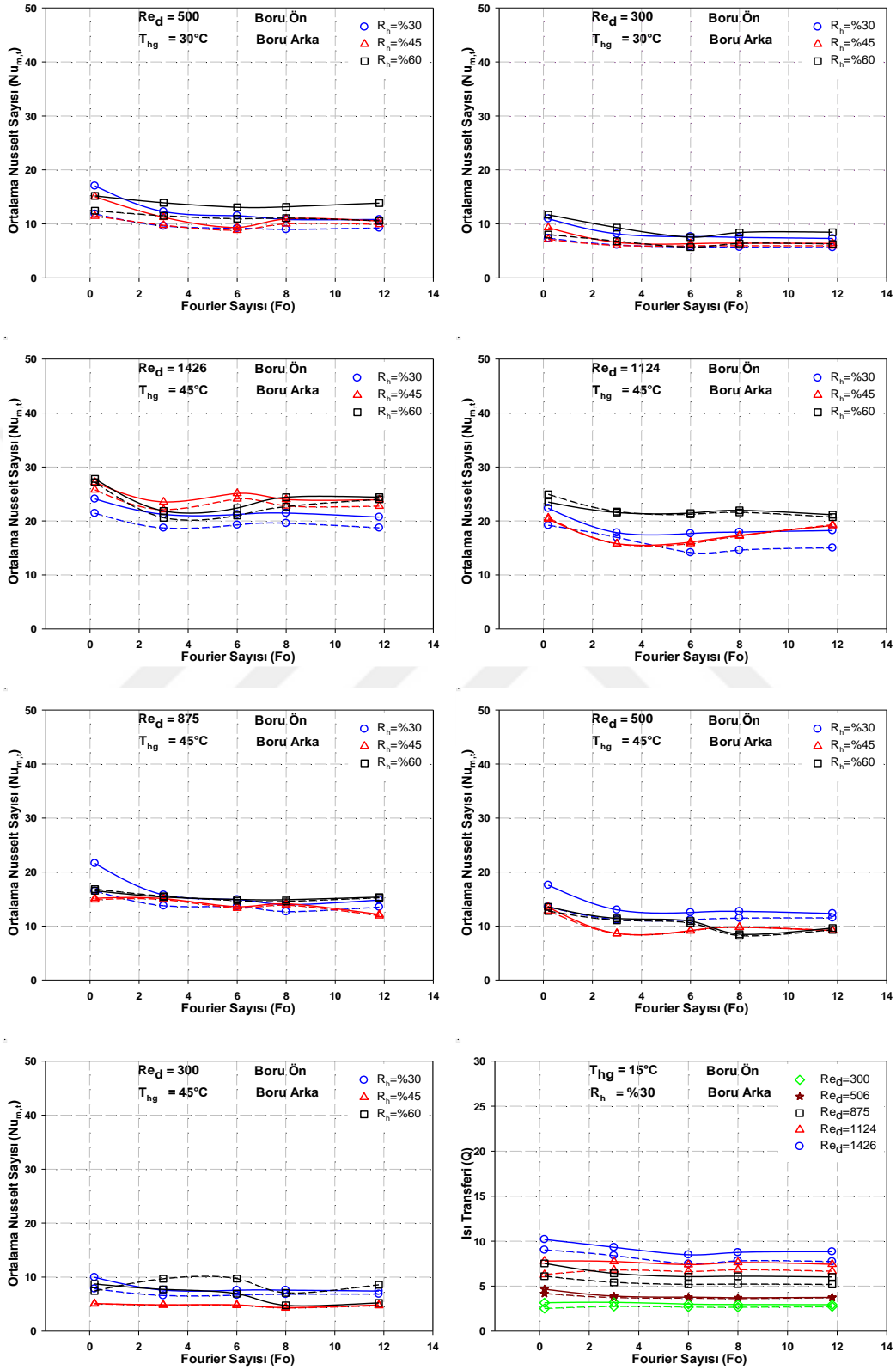
Şekil E2.3. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ortalama Nusselt sayısının zamana göre değişimi



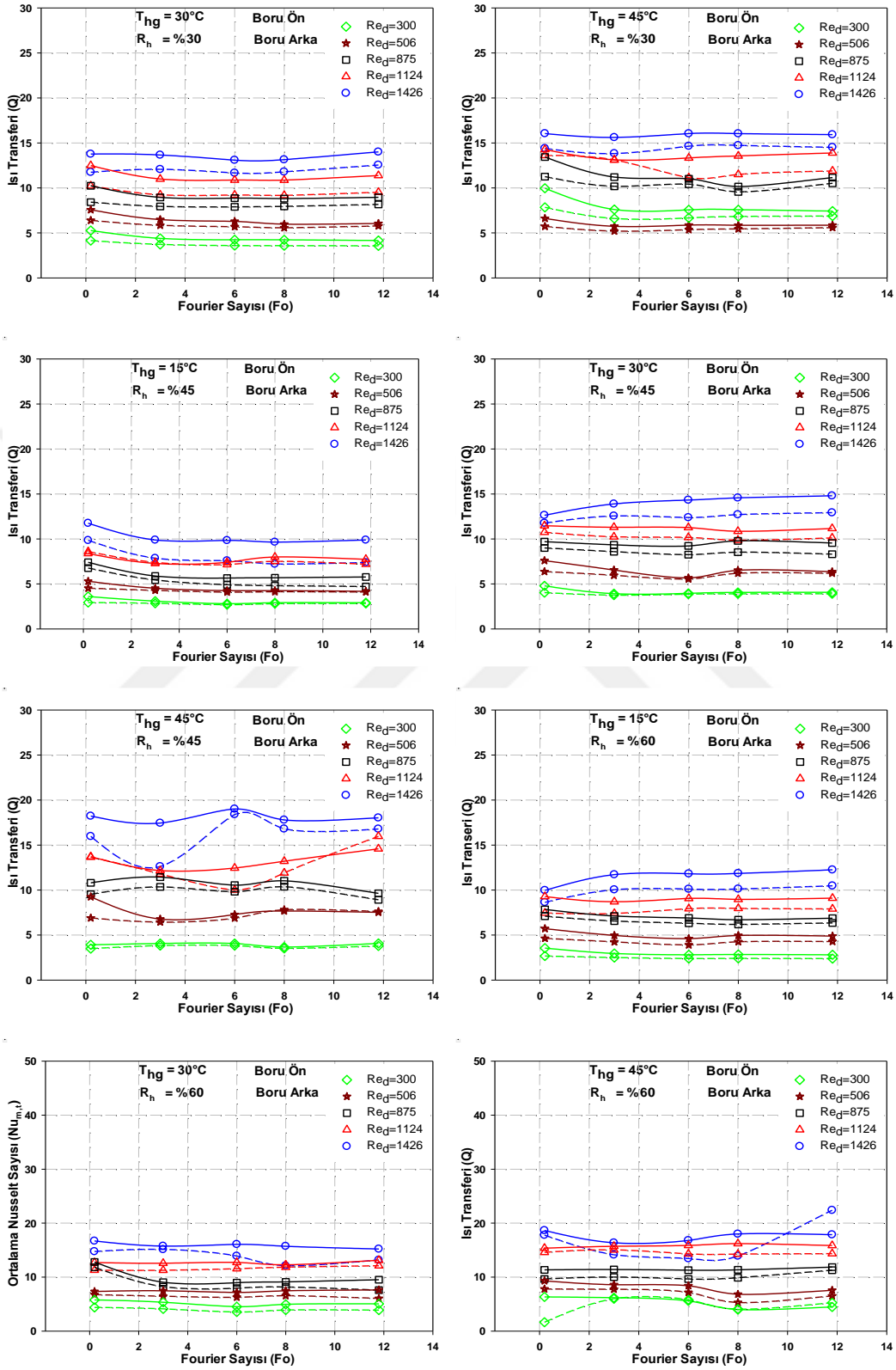
Şekil E2.4. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ortalama Nusselt sayısının zamana göre değişimi



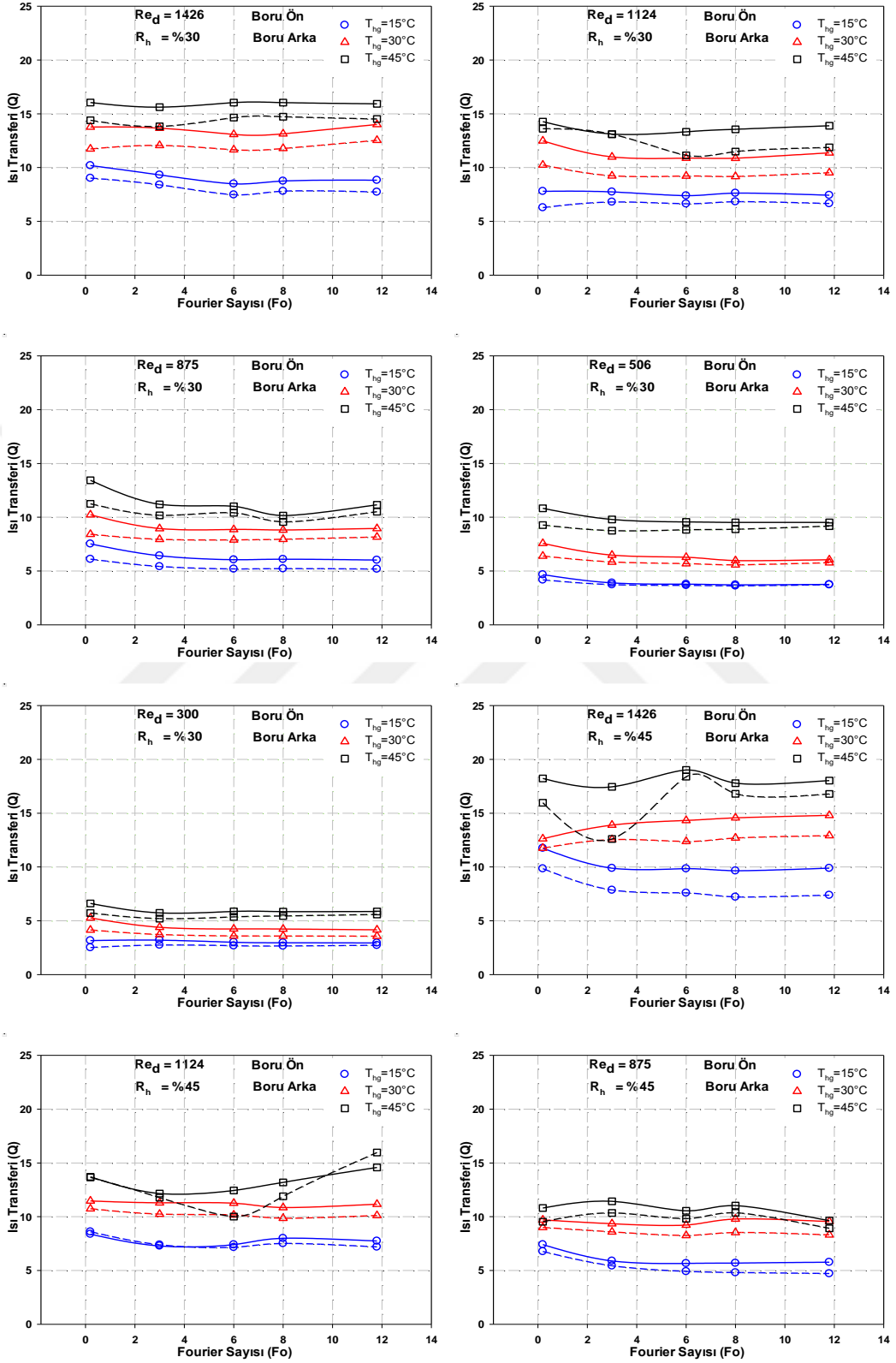
Şekil E2.5. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde $Nu_{m,t}$ ' nin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ısı transferinin zamana göre değişimi



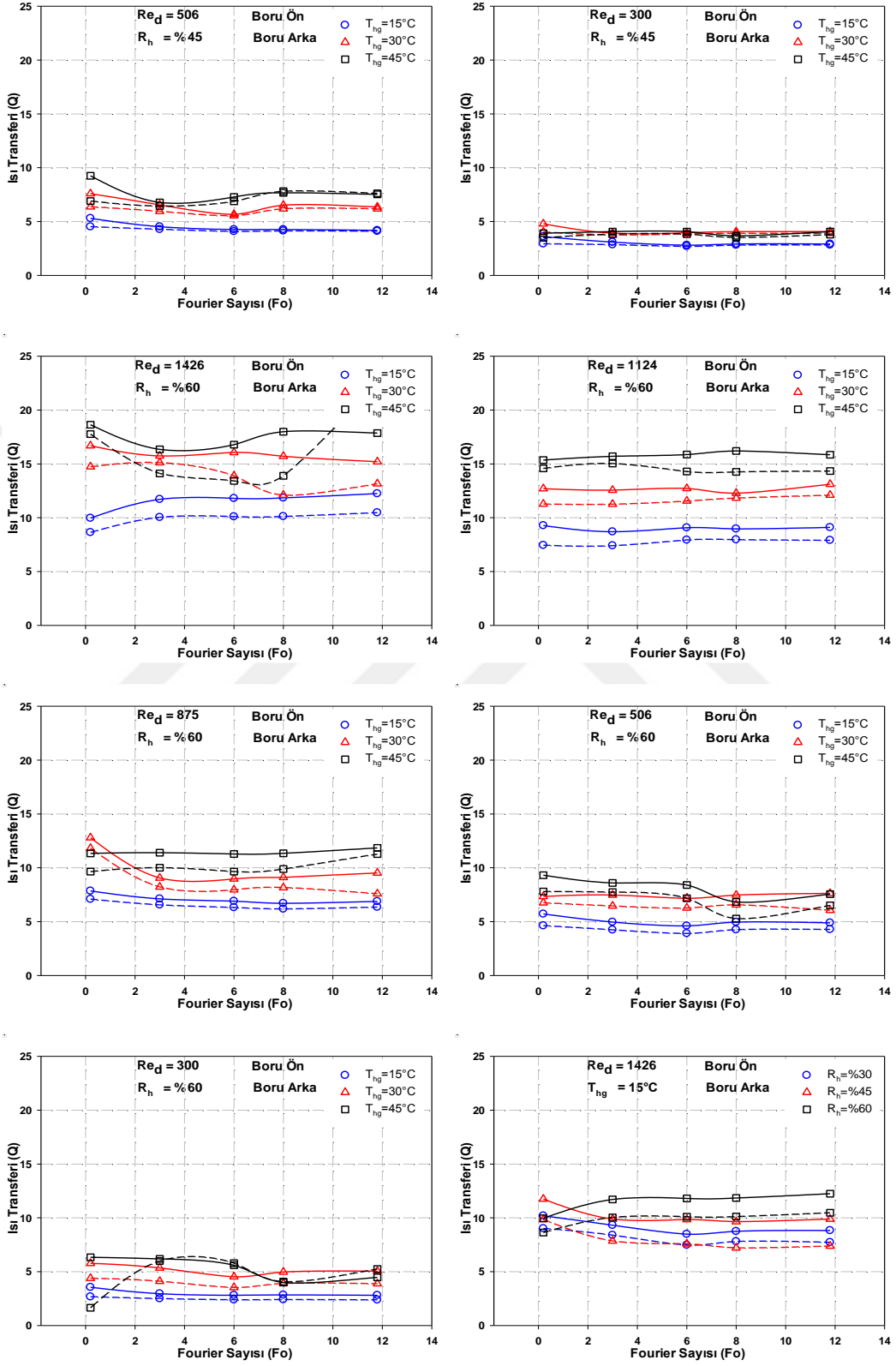
Şekil E2.6. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ısı transferinin zamana göre değişimi



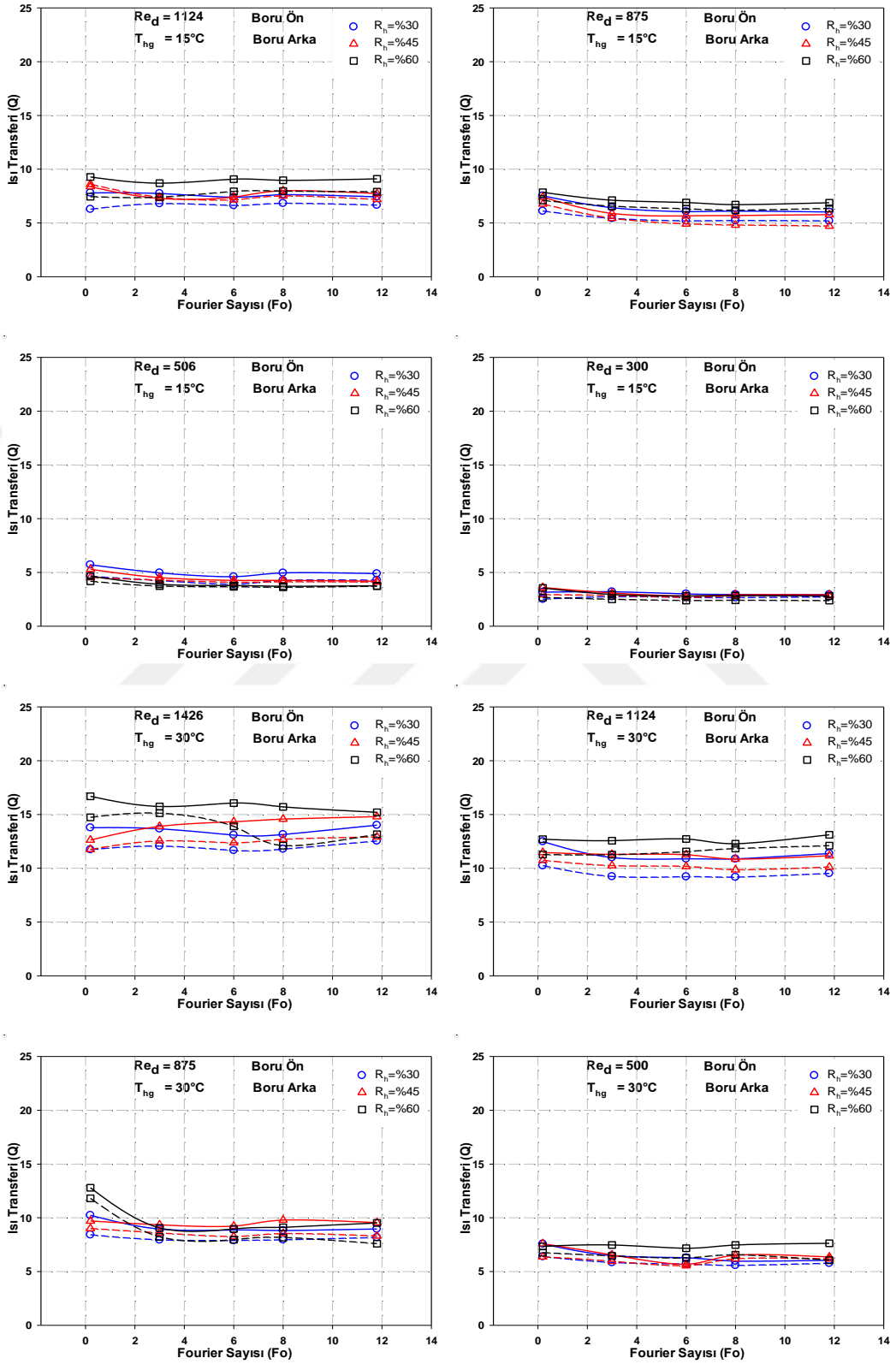
Şekil E2.7. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ısı transferinin zamana göre değişimi



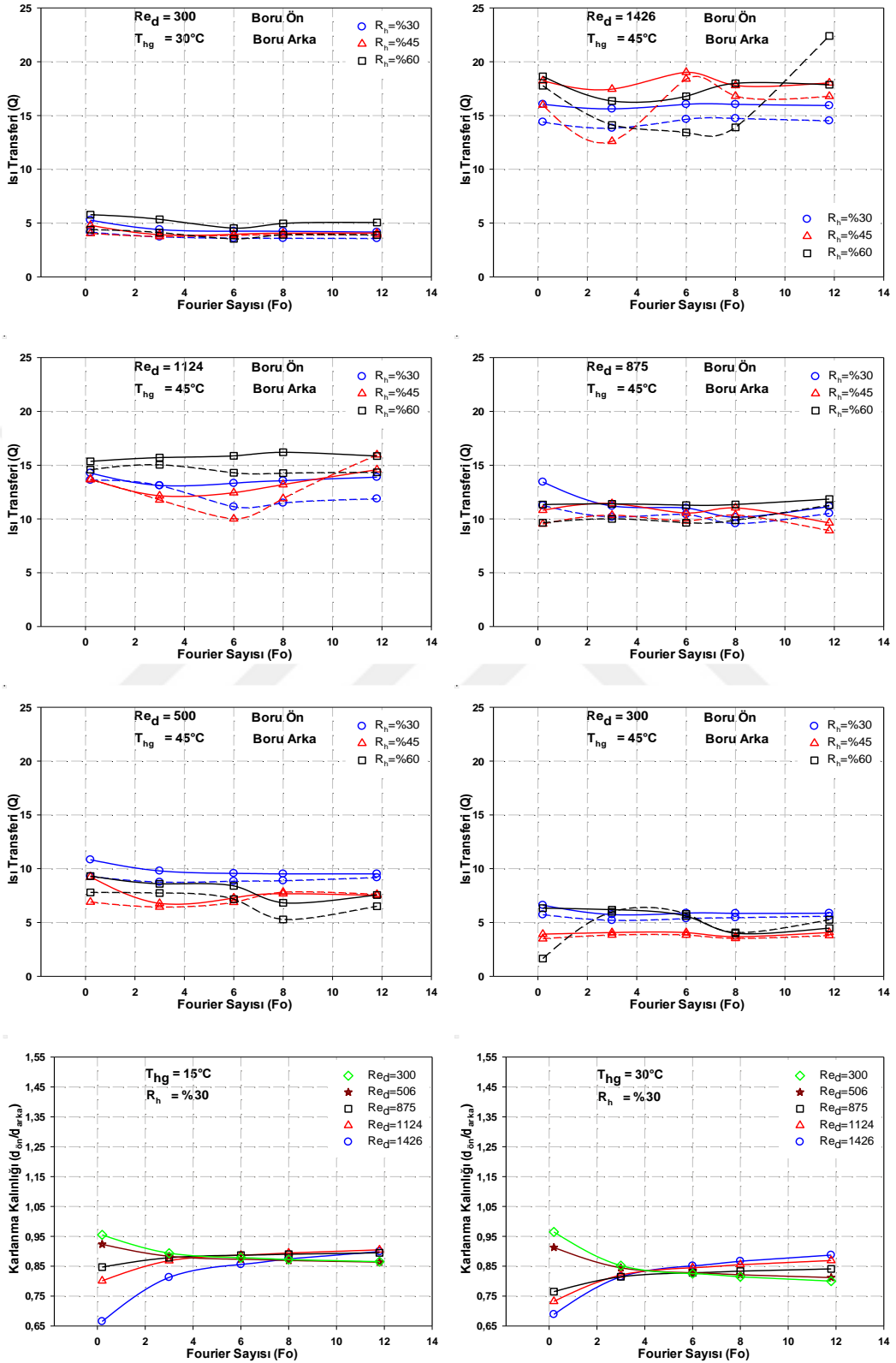
Şekil E2.8. Farklı T_{hg}, R_h ve Re_d' lerde ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ısı transferinin zamana göre değişimi



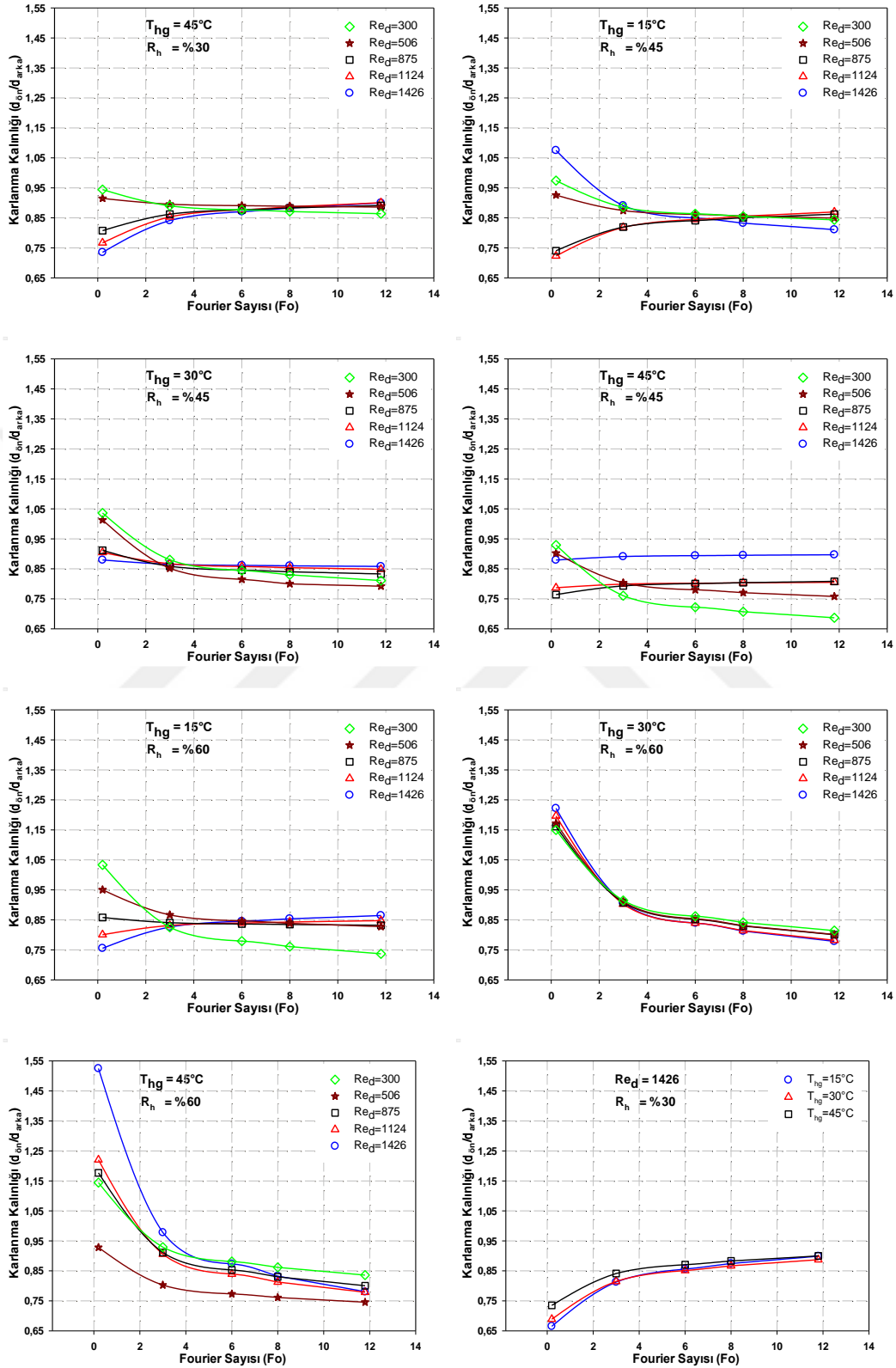
Şekil E2.9. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki ısı transferinin zamana göre değişimi



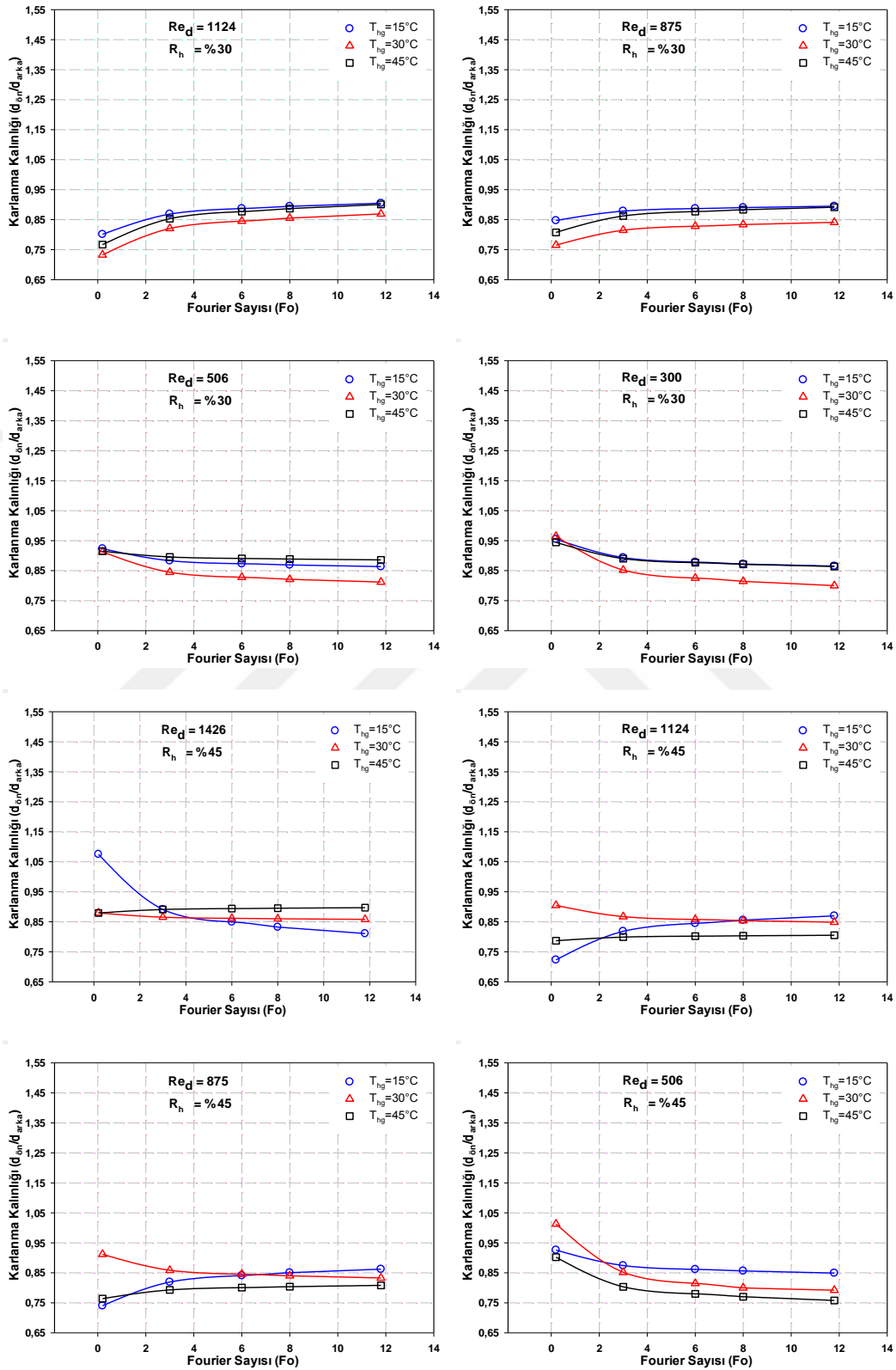
Şekil E2.10. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi



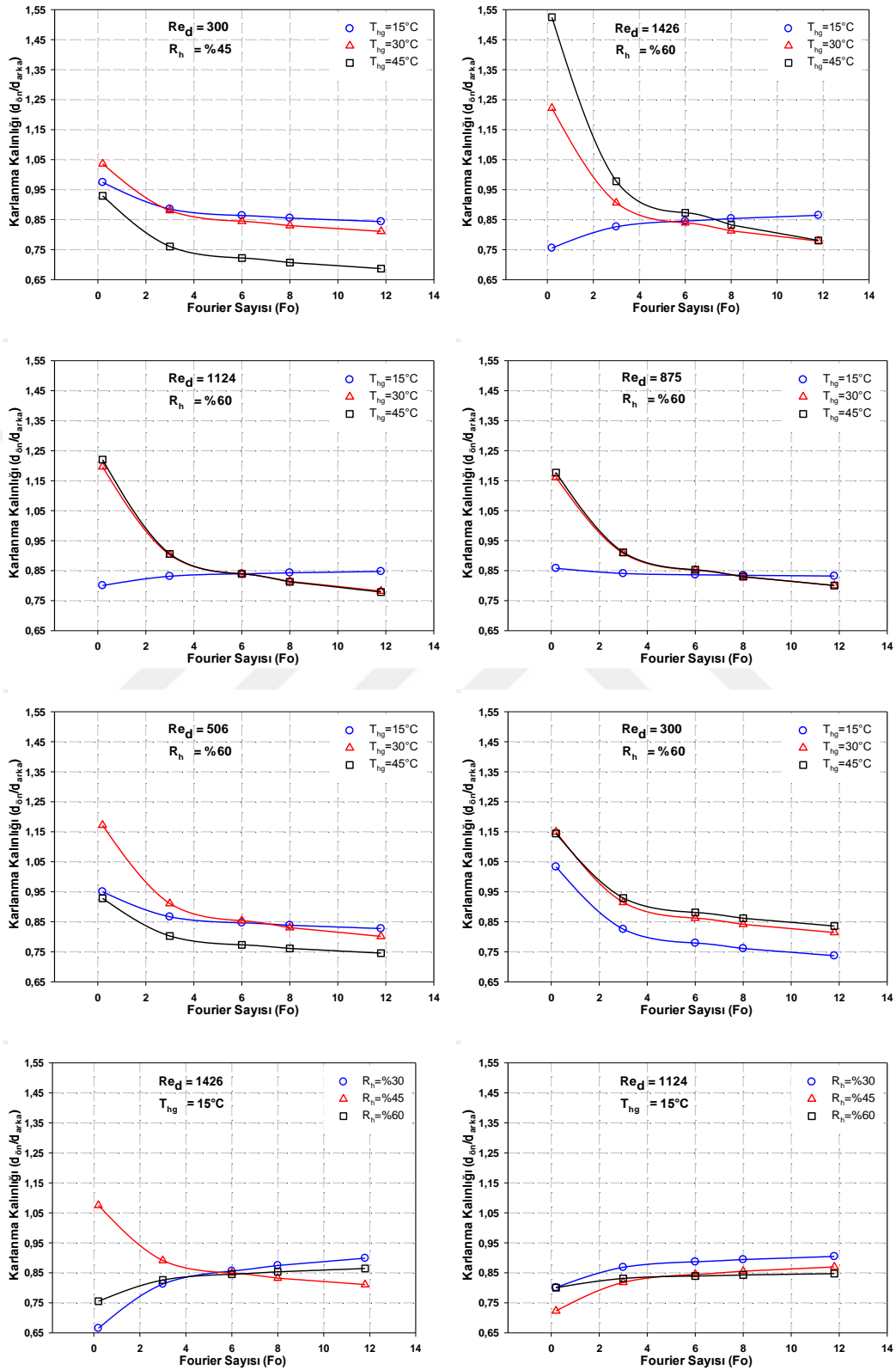
Şekil E2.11. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d lerde karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi



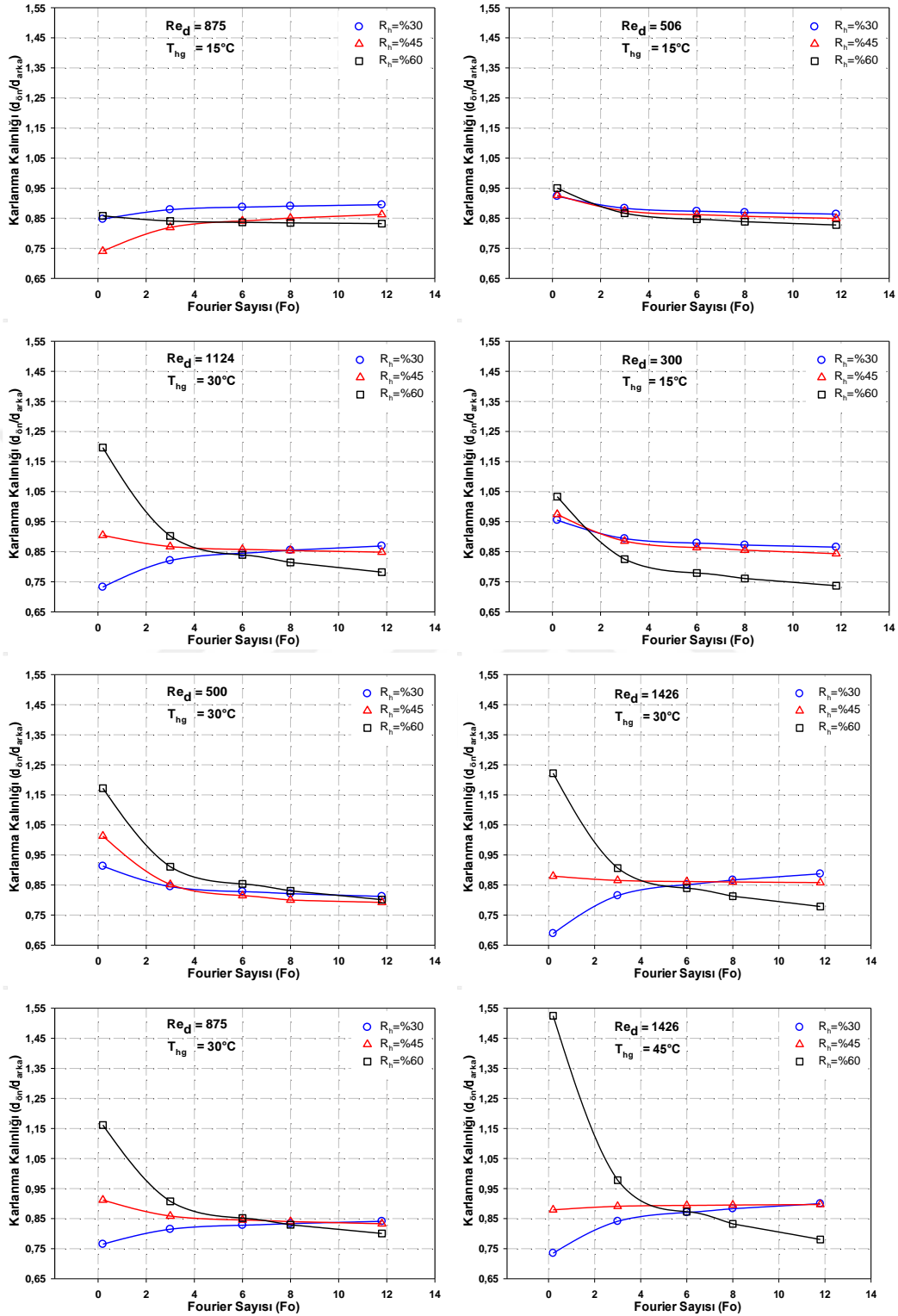
Şekil E2.12. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ’lerde karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi



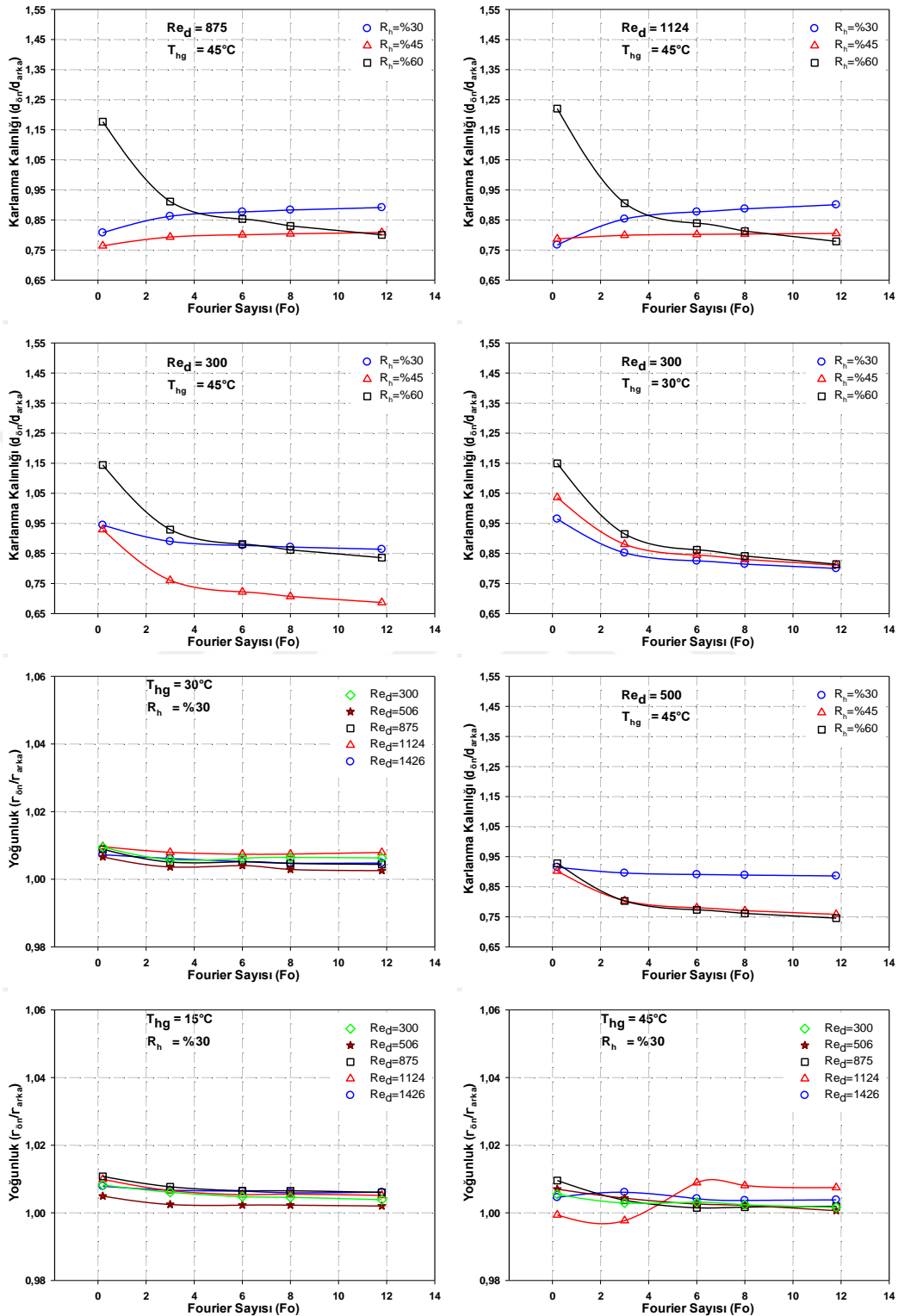
Şekil E2.13. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d lerde karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi



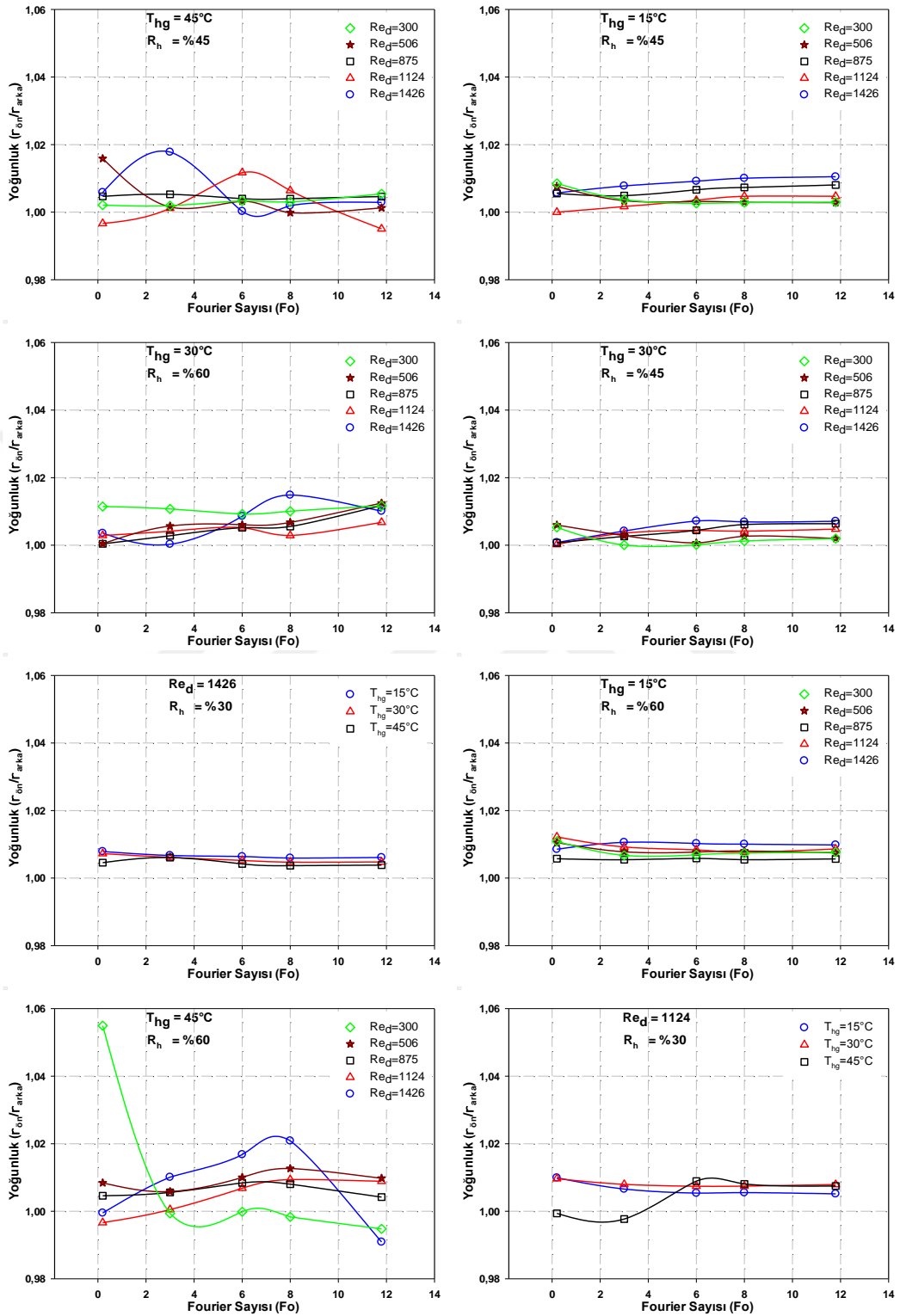
Şekil E2.14. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d 'lerde karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi



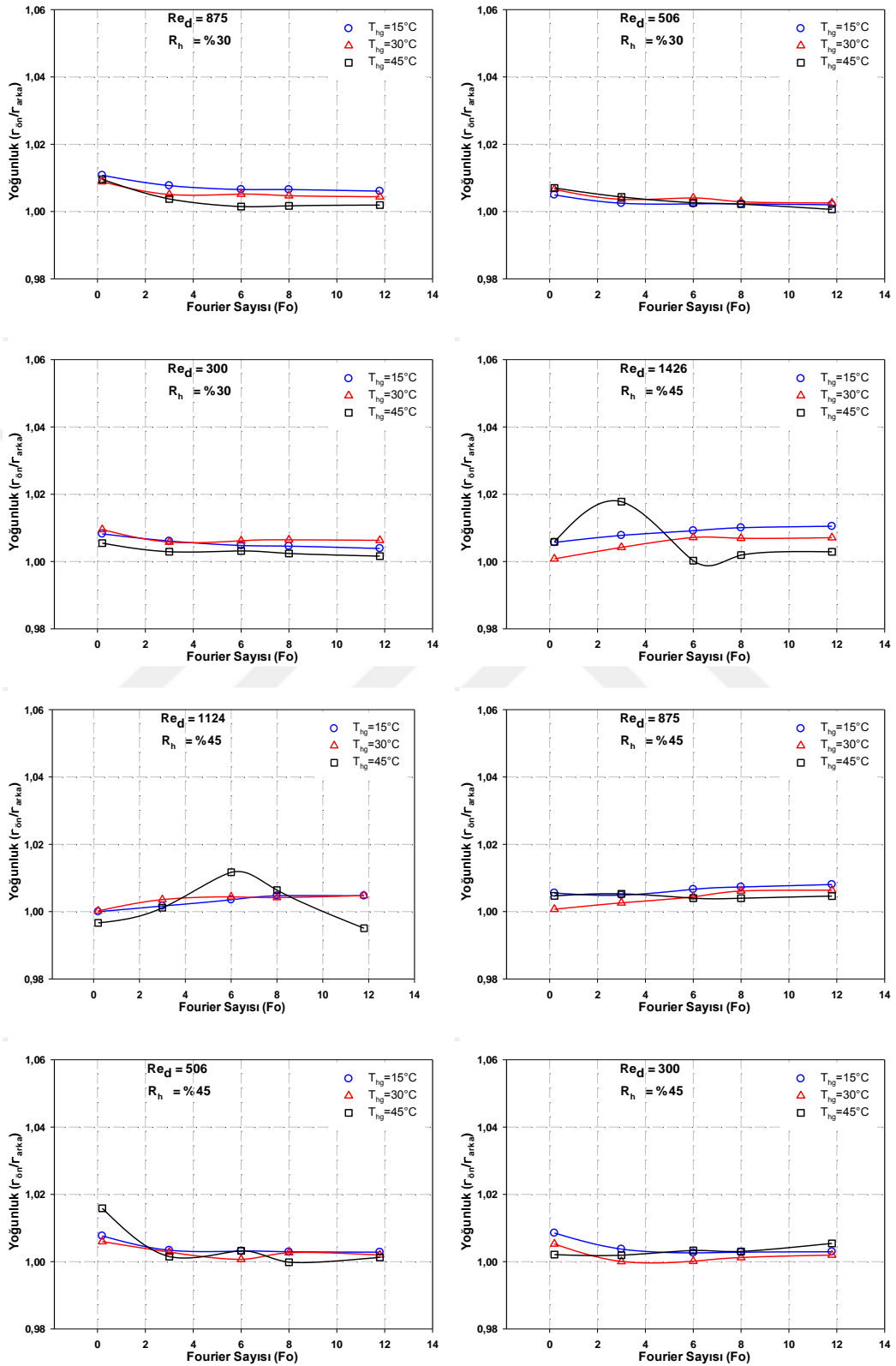
Şekil E2.15. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d 'lerde karlanma kalınlığı oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi



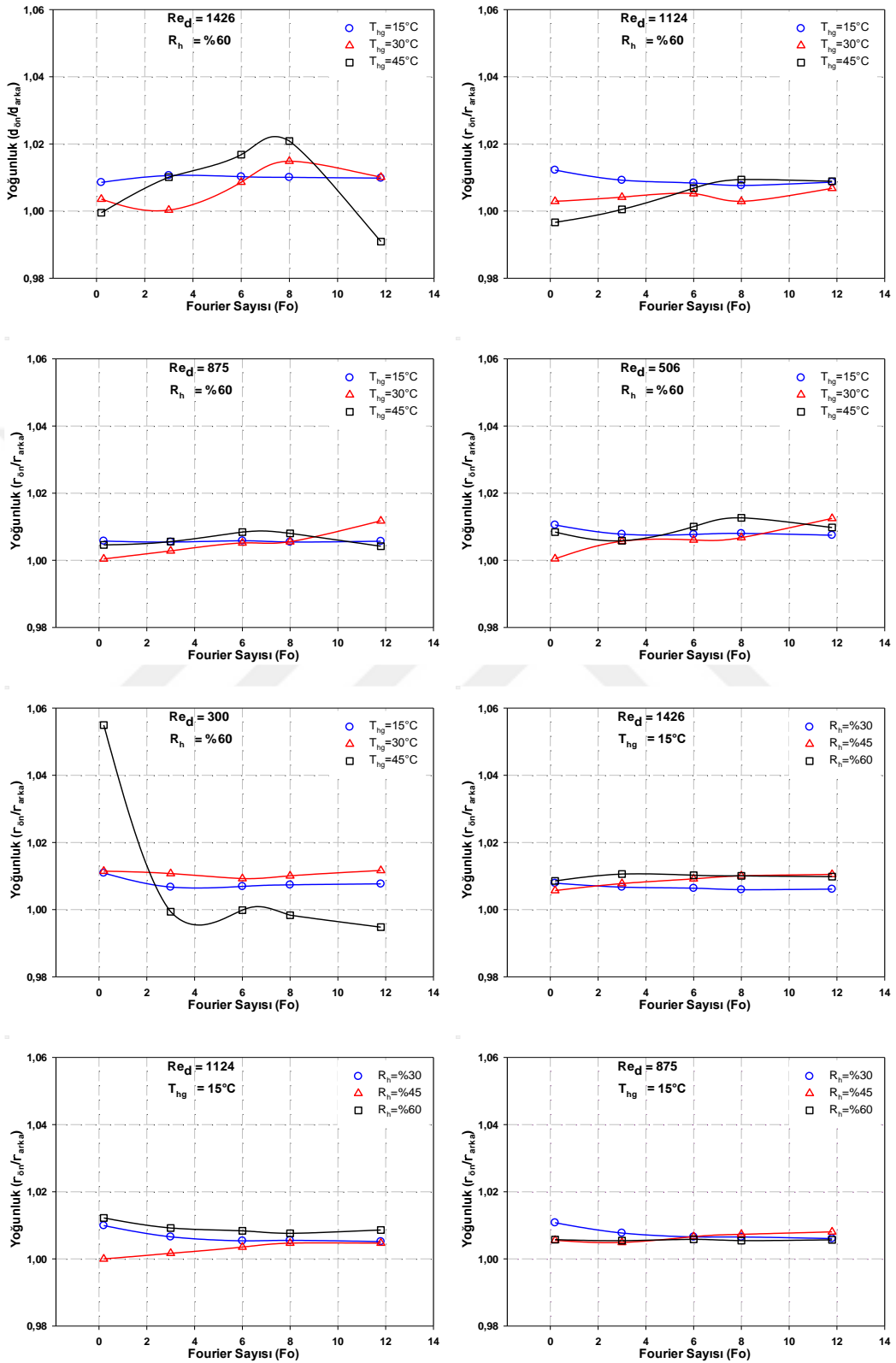
Şekil E2.16. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi



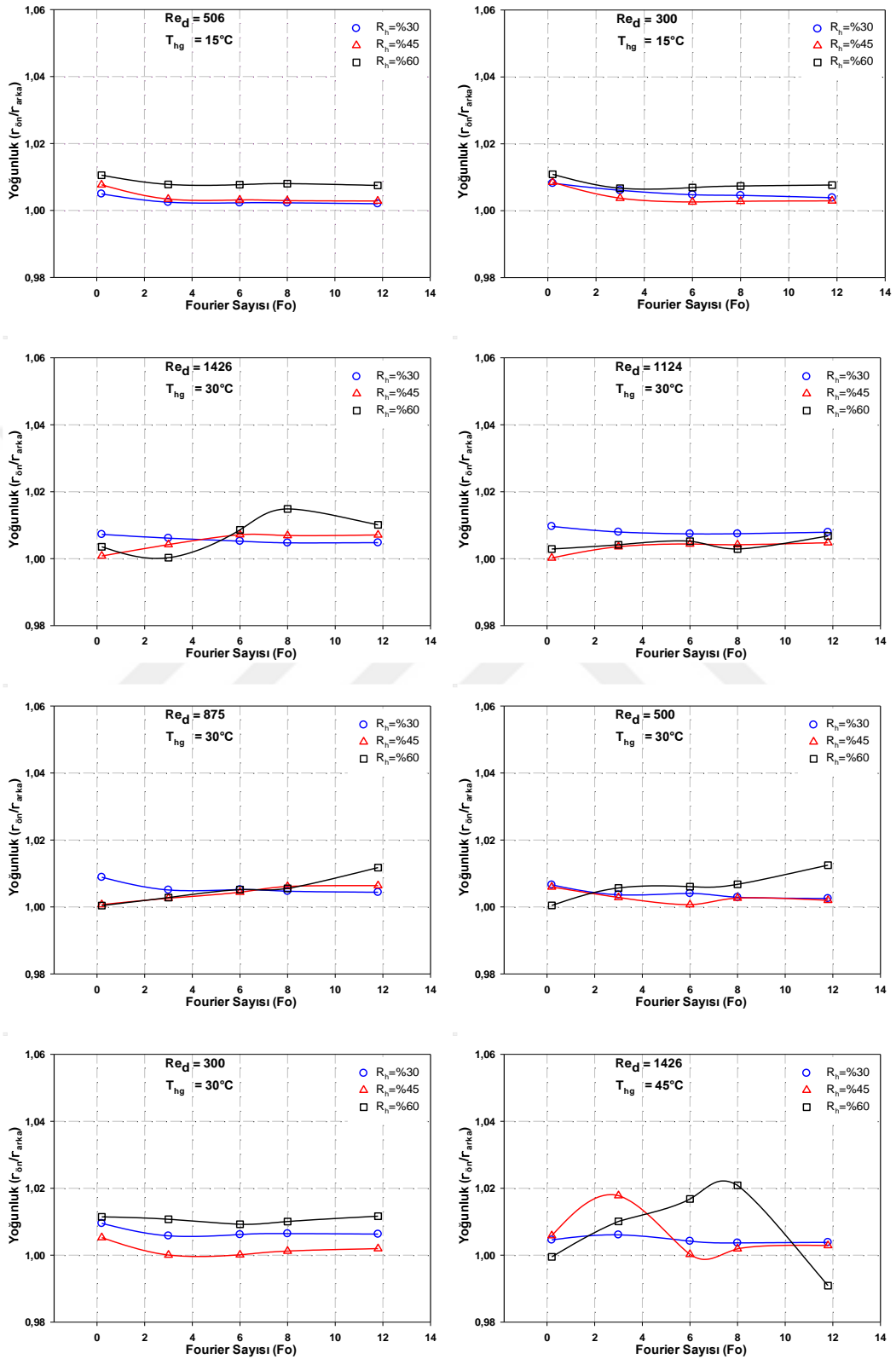
Şekil E2.17. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi



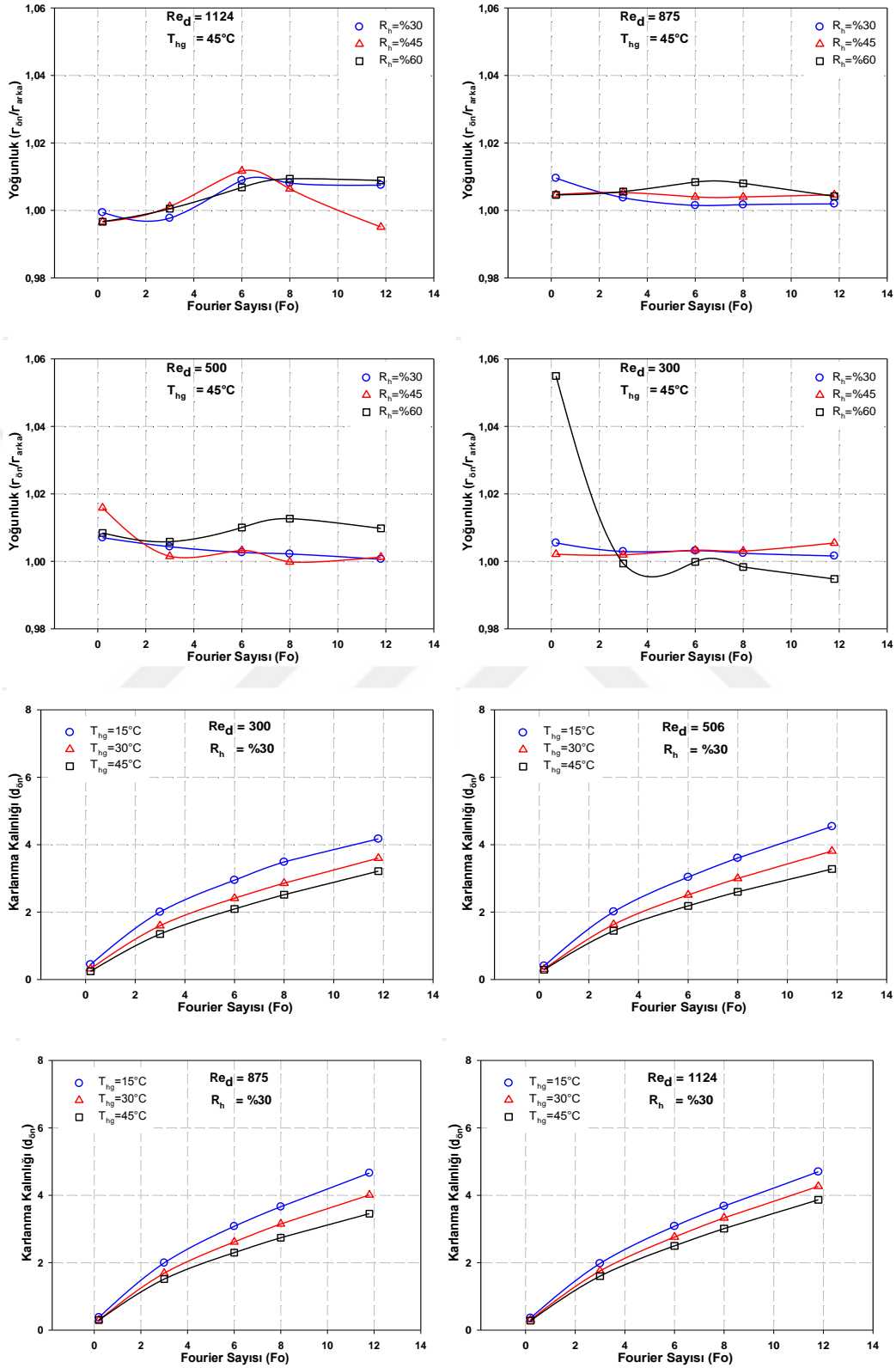
Şekil E2.18. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi



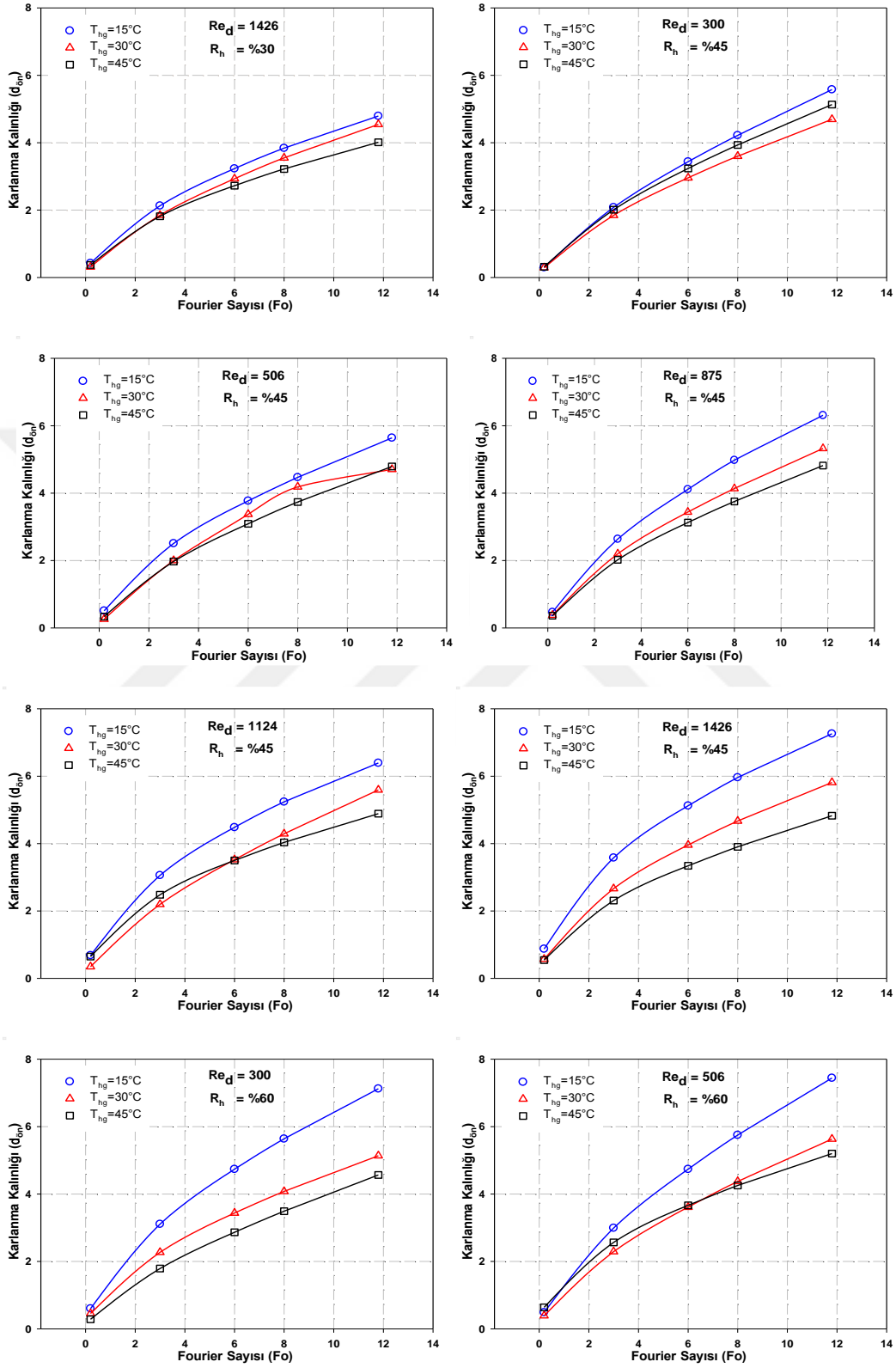
Şekil E2.19. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön ve arkasındaki karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi



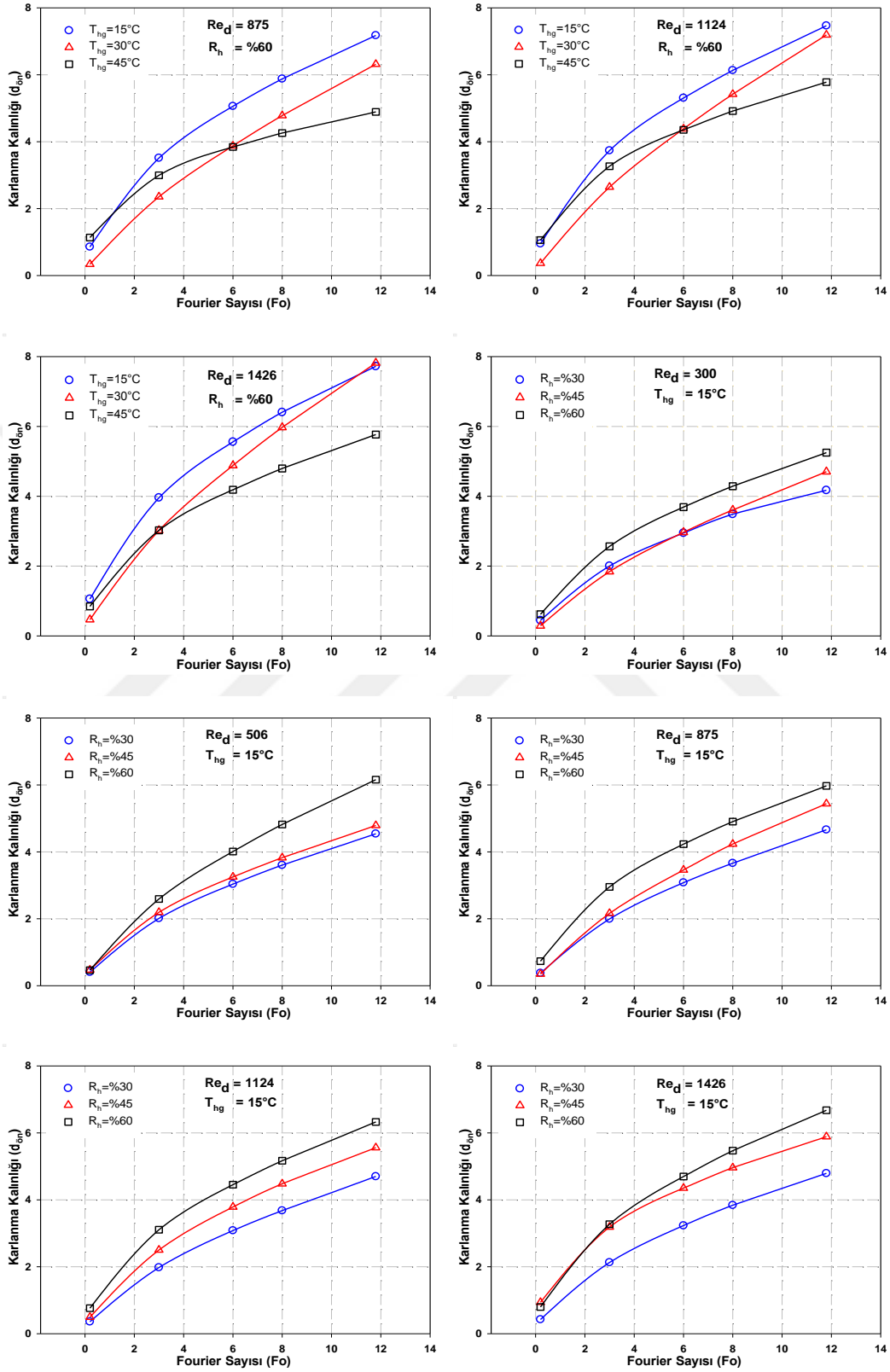
Şekil E2.20. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma yoğunluğu oranının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön tarafındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi



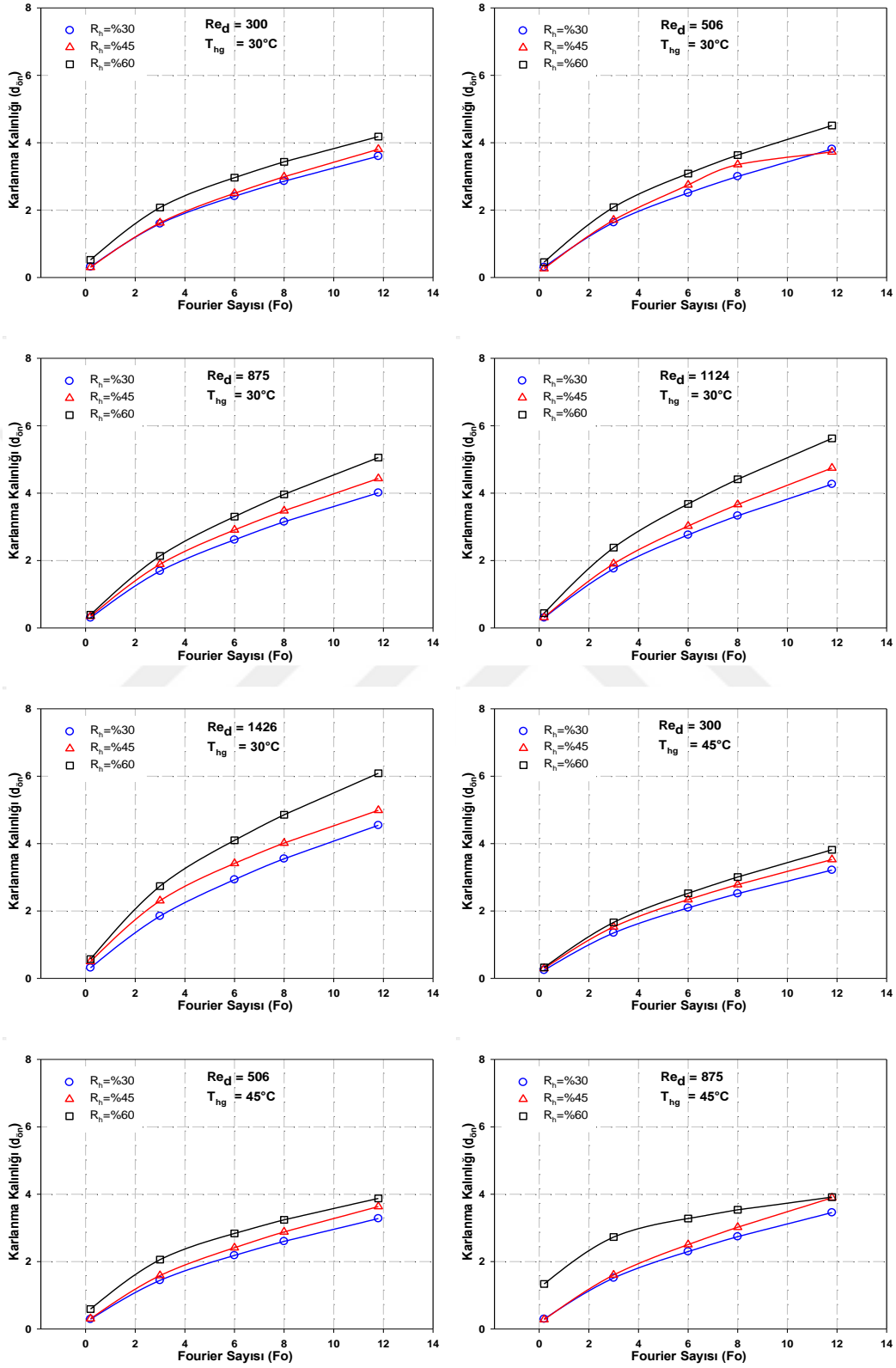
Şekil E2.21. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ’lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön tarafındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi



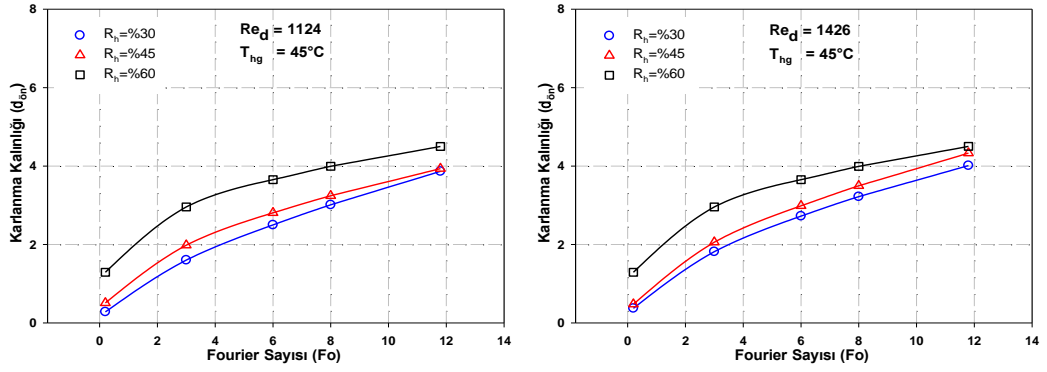
Şekil E2.22. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ' lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön tarafındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi



Şekil E2.23. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d ’lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

EK-2(Devam). Boru ön tarafındaki karlanma kalınlığının zamana göre değişimi



Şekil E2.24. Farklı T_{hg} , R_h ve Re_d 'lerde karlanma kalınlığının zamana göre değişimi

EK-3. Belirsizlik analizleri

Debi:

$$R = 0,035837952$$

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2}$$

$$= \sqrt{(d \cdot c \cdot \Delta m)^2 + (d \cdot m \cdot \Delta c)^2 + (m \cdot c \cdot \Delta d)^2}$$

$$= 0,0029228995$$

$$= 2,9228995 * 3 \cdot 10^{-3}$$

$$= 3 \cdot 10^{-3}$$

$$R = (3,6 \mp 0,3) * 10^{-2}$$

Isı Transferi:

$$R = 20,244728$$

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2}$$

$$= \sqrt{(d \cdot c \cdot \Delta m)^2 + (d \cdot m \cdot \Delta c)^2 + (m \cdot c \cdot \Delta d)^2}$$

$$= 0,2189593432$$

$$= 2,189593432 * 10^{-1}$$

$$= 2 \cdot 10^{-1}$$

Kesit Alanı:

$$R = 0,035837952$$

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2}$$

$$= \sqrt{(d \cdot c \cdot \Delta m)^2 + (d \cdot m \cdot \Delta c)^2 + (m \cdot c \cdot \Delta d)^2}$$

$$= 0,0029228995$$

$$= 2,9228995 * 10^{-3}$$

$$= 3 * 10^{-3}$$

$$R = (3,6 \mp 0,3) * 10^{-2}$$

Taşınım Katsayısı:

$$R = 216,4820860807$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(a \cdot \frac{d}{(d \cdot a)^2} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{(d \cdot a)^2} \cdot a\right) \cdot \Delta d\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{(d \cdot a)^2} \cdot d\right) \cdot \Delta a\right)^2} \\ &= 2,3889508866 \\ &= 2,3889508866 * 10^0 \\ &= 2 * 10^0 \end{aligned}$$

$$R = (2,16 \mp 0,02) * 10^2$$

$$R = 2,9717546709$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(a \cdot \frac{d}{(d \cdot a)^2} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{(d \cdot a)^2} \cdot a\right) \cdot \Delta d\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{(d \cdot a)^2} \cdot d\right) \cdot \Delta a\right)^2} \\ &= 0,0890901134 * 10^{-2} \\ &= 8,90901134 * 10^{-2} \\ &= 9 * 10^{-2} \end{aligned}$$

$$R = (2,97 \mp 0,09) * 10^0$$

Nusselt Sayısı:

$$R = 120,0679841897$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{d}{a} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{m}{a} \Delta d\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{a^2} \cdot d\right) \cdot \Delta a\right)^2} \\ &= 4,230309635 \\ &= 4,230309635 * 10^0 \\ &= 4 * 10^0 \end{aligned}$$

$$R = (1,2 \mp 0,04) * 10^2$$

Reynolds Sayısı:

$$R=1715,8065912918$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial n} \Delta n\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(d \cdot \frac{a}{n} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(m \cdot \frac{a}{n} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(d \cdot \frac{m}{n} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{n^2} d \cdot a\right) \cdot \Delta n\right)^2} \\ &= 71,3009706401 \\ &= 7,130097064 * 10^1 \\ &= 7 * 10^1 \end{aligned}$$

$$R = (1,72 \mp 0,07) * 10^3$$

$$R = 361,568438778$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial n} \Delta n\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(d \cdot \frac{a}{n} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(m \cdot \frac{a}{n} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(d \cdot \frac{m}{n} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{n^2} d \cdot a\right) \cdot \Delta n\right)^2} \\ &= 13,0465597062 \\ &= 1,3046559706 * 10^1 \\ &= 1 * 10^1 \end{aligned}$$

$$R = (3,6 \mp 0,1) * 10^2$$

$$R = 0,3543642857$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{d}{a} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{m}{a} \Delta d\right)^2 + \left(-\left(\frac{m}{a^2} \cdot d\right) \cdot \Delta a\right)^2} \\ &= 0,0071049818 \\ &= 7,1049818 * 10^{-3} \\ &= 7 * 10^{-3} \end{aligned}$$

$$R = (3,54 \mp 0,07) * 10^{-1}$$

